

PAULO ROBERTO CHAMECKI

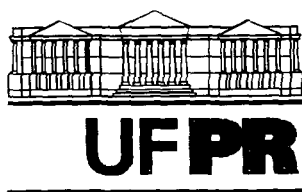
**METODOLOGIAS DE LABORATÓRIO PARA ESTUDOS  
DA EROSÃO HÍDRICA EM SOLOS:  
APLICAÇÃO A UMA ARGILA DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Ciência do Solo, para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Teixeira  
da Silva

CURITIBA

2002




MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA: CIÊNCIA DO SOLO(MESTRADO) e  
MONITORAMENTO, MODELAGEM E GESTÃO AMBIENTAL(DOUTORADO)  
Rua dos Funcionários, 1540-Curitiba/PR-80035-050-Fone/Fax 41-350-5648  
E-mail: [pgcisol@agrarias.ufpr.br](mailto:pgcisol@agrarias.ufpr.br)

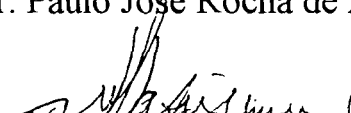
## P A R E C E R

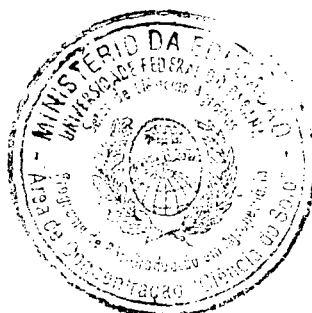
Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentado pelo candidato **PAULO ROBERTO CHAMECKI**, com o título: : **"Metodologias de Laboratório para Estudos da Erosão Hídrica em Solos: Aplicação a uma Argila da Formação Guabirotuba."**, para obtenção do grau de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo" do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de Parecer pela **"APROVAÇÃO"** da Dissertação, com o conceito **"A"**, completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo"**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", em Curitiba 30 de setembro de 2002.

  
Prof. Dr. Eduardo Teixeira da Silva, Presidente.

  
Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque, Iº Examinador.

  
Prof. Dr. Ney Augusto Nascimento, IIº Examinador.



Este trabalho é dedicado aos meus familiares,  
pelo apoio e paciência;  
À minha querida esposa Christine;  
Aos meus filhos grandes amigos Marcelo e  
Eduardo;  
Aos meus enteados Silvia, Renée e Gonçalo;  
À minha mãe, Chanda, e irmãs.

## AGRADECIMENTOS

Aos professores Eduardo Teixeira da Silva, pela amizade e orientação, e Celso Luiz Prevedello, pelo estímulo e apoio no curso. Aos demais professores do curso de Ciência do Solo, Valmiqui Costa Lima, Mauricio Gobbi, Marco Aurélio M. Machado, por seus ensinamentos, bem como ao atual coordenador, prof. Vander de F. Melo

Aos integrantes da banca, professores Ney Augusto Nascimento e Paulo José Rocha de Albuquerque, pelas valiosas contribuições e correções.

Ao colega e amigo Ruy Dikram Steffen, gerente do Laboratório de Materiais e Estruturas – LAME onde foi realizada a parte experimental da pesquisa, por seu apoio fundamental.

À diretoria do Instituto de Tecnologia Para o Desenvolvimento – LACTEC, do qual o LAME é parte integrante.

Aos estagiários do LAME que participaram da pesquisa, pelo trabalho e entusiasmo que foram fundamentais para sua execução, principalmente Rogério Broietti, Robson Okimoto, Leonardo Chagas, Pedro Thá, Tatiane Utumi, Alex B. da Cruz, Paulo Fornari, André Nagalli e Silvia Levis.

Aos técnicos do LAME que, com sua experiência e criatividade, tanto colaboraram, Celso A. de Souza, João Luiz Alves, Roberto R. Zorzi, Rosane C. Dias e Valdevan Santos.

Aos engenheiros, pesquisadores e bolsistas do LAME, pelas idéias e auxílio, Roberta B. Boszczowski, Cintia Ribeiro, Rosângela M. Gomes e Plínio H. Martins.

Aos colegas do Departamento de Construção Civil da UFPR, em especial Alessandro M. Kormann, pelo apoio, incentivo e informações.

Às colegas do curso de Ciências do Solo, Clarice F. de Lemos e Jocely T. Loyola.

Aos funcionários do Setor de Ciências Agrárias, pelo auxílio, Maria Aparecida dos Santos no laboratório e Gerson Novicki na secretaria.

Ao professor Ériclis P. Freire, pelas informações a respeito do ensaio GES por ele idealizado.

Ao professor Eduardo F. Gobbi, pelo estímulo e incentivo à participação no curso.



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE GRÁFICOS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.3 ESCOPO DO TRABALHO .....	5
<b>2 EROSÃO HÍDRICA, ERODIBILIDADE E MÉTODOS DE CONTROLE ..</b>	<b>7</b>
2.1 EROSÃO E ERODIBILIDADE .....	7
2.2 A EROSÃO HÍDRICA PLUVIAL .....	9
2.3 FATORES FÍSICOS.....	13
2.4 PROCESSOS EROSIVOS.....	14
2.5 CONTROLE DE EROSÃO E CONSERVAÇÃO DOS SOLOS .....	18
2.6 PLANEJAMENTO AMBIENTAL E PLANIFICAÇÃO DO USO DO SOLO.....	19
2.7 PREVISÃO DE PERDA DE SOLOS E MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO.....	20
<b>3 A FORMAÇÃO GUABIROTUBA .....</b>	<b>27</b>
3.1 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	27
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGILAS RIJAS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA .....	29
3.3 EROSÃO E ERODIBILIDADE NA FORMAÇÃO GUABIROTUBA.....	33
3.4 CARACTERÍSTICAS DE INTERESSE PARA A PESQUISA.....	36
<b>4 SISTEMA DA QUALIDADE EM LABORATÓRIOS DE ENSAIOS.....</b>	<b>37</b>
4.1 CONCEITOS BÁSICOS DO SISTEMA DE GARANTIA DA QUALIDADE.....	38
4.2 SISTEMA DA QUALIDADE EM LABORATÓRIOS.....	42
4.3 INSERÇÃO DA METODOLOGIA DE EROSÃO NO SISTEMA DA QUALIDADE .....	46
<b>5 MÉTODOS PARA ESTUDO DA EROSÃO EM LABORATÓRIO.....</b>	<b>49</b>
5.1 MÉTODOS RELATADOS NA LITERATURA.....	49
5.2 SELEÇÃO DE MÉTODOS PARA A PESQUISA.....	56
<b>6 METODOLOGIA E MATERIAIS.....</b>	<b>58</b>
6.1 AMOSTRAS.....	59
6.1.1 Seleção, Origem e Coleta.....	59
6.1.2 Preparação das Amostras.....	63
6.2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS DE EROSÃO .....	63
6.2.1 Ensaio do Torrão ("Crumb Test").....	64
6.2.2 Ensaio Sedimentométrico Comparativo (Dispersão SCS).....	72
6.2.3 Ensaio do Furo de Agulha ("Pinhole Test").....	83
6.2.4 Análise Química da Água Intersticial do Solo.....	94

6.2.5 Ensaio de Desagregação (" <i>Slaking Test</i> ").....	102
6.2.6 Ensaio Inderbitzen.....	113
6.2.7 Ensaio Inderbitzen Modificado (GES).....	129
<b>7 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	142
7.1 AMOSTRAS.....	142
7.2 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICAS, COMPACTAÇÃO E SUÇÃO.....	144
7.3 ENSAIO DO TORRÃO (" <i>CRUMB TEST</i> ").....	151
7.4 ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO (" <i>SLAKING TEST</i> ").....	153
7.5 ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO.....	161
7.6 ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA INTERSTICIAL DO SOLO.....	169
7.7 ENSAIO DO FURO DE AGULHA .....	172
7.8 ENSAIO INDERBITZEN .....	186
7.9 ENSAIO INDERBITZEN MODIFICADO (GES).....	207
<b>8 CONCLUSÕES</b> .....	218
8.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	224
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	225
<b>ANEXOS</b> .....	233

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EROSÃO EM TALUDE NA ARGILA RIJA DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA.....	33
FIGURA 2 - EROSÃO NA ARGILA RIJA, EM TALUDE NO CENTRO POLITÉCNICO DA UFPR.....	60
FIGURA 3 - SÍTIO EXPERIMENTAL DE GEOTECNIA DA UFPR, PLANTA DA ÁREA 1.....	61
FIGURA 4 - COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DA ARGILA EM ANÉIS METÁLICOS.....	62
FIGURA 5 - ENSAIO DO TORRÃO, EQUIPAMENTO E PREPARAÇÃO.....	67
FIGURA 6 - ENSAIO DO TORRÃO, INÍCIO E ANDAMENTO.....	68
FIGURA 7 - ENSAIO DO TORRÃO, ARGILA COM DESAGREGAÇÃO.....	70
FIGURA 8 - ENSAIO DO TORRÃO, SOLO ARENOSO COM DISPERSÃO.....	71
FIGURA 9 - ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO, INÍCIO.....	76
FIGURA 10 - ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO, ETAPAS.....	77
FIGURA 11 - ENSAIO DO FURO DE AGULHA, APARELHO <i>PINHOLE</i> .....	85
FIGURA 12 - ENSAIO DO FURO DE AGULHA, CORPO DE PROVA TALHADO DA ARGILA.....	87
FIGURA 13 - ENSAIO DO FURO DE AGULHA, CORPO DE PROVA MOLDADO DO SOLO ARENOSO.....	88
FIGURA 14 - ENSAIO DO FURO DE AGULHA, FINAL DA PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA.....	89
FIGURA 15 - ENSAIO DO FURO DE AGULHA, ANDAMENTO.....	90
FIGURA 16 - ENSAIO DO FURO DE AGULHA, FINAL.....	92
FIGURA 17 - ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA INTERSTICIAL DO SOLO, EQUIPAMENTOS.....	96
FIGURA 18 - ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA INTERSTICIAL DO SOLO, EXTRAÇÃO DE ÁGUA.....	98
FIGURA 19 - ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA INTERSTICIAL DO SOLO, MÉTODOS.....	100
FIGURA 20 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO COMPARANDO A ARGILA RESSECADA E NA UMIDADE NATURAL.....	108
FIGURA 21 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO COMPARANDO O SOLO ARENOSO NA UMIDADE ÓTIMA E RESSECADA.....	109
FIGURA 22 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO DO SOLO ARENOSO, COM CICLOS DE RESSECAMENTO E SUBMERSÃO.....	110
FIGURA 23 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, COM ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	111
FIGURA 24 - ENSAIO INDERBITZEN, EQUIPAMENTO.....	118
FIGURA 25 - ENSAIO INDERBITZEN, CORPOS DE PROVA.....	120
FIGURA 26 - ENSAIO INDERBITZEN, DETALHES DA EXECUÇÃO.....	123
FIGURA 27 - ENSAIO INDERBITZEN EM AMOSTRA DE ARGILA RESSECADA.....	126
FIGURA 28 - ENSAIO INDERBITZEN MODIFICADO, EQUIPAMENTOS E AMOSTRAS DE ARGILA.....	134
FIGURA 29 - ENSAIO INDERBITZEN MODIFICADO, AMOSTRA DE SOLO ARENOSO.....	136
FIGURA 30 - ENSAIO INDERBITZEN MODIFICADO COM ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	138
FIGURA 31 - ENSAIO INDERBITZEN MODIFICADO COM ARGILA RESSECADA.....	139

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA, ARGILA PREPARADA POR VIA SECA.....	145
GRÁFICO 2 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA, SOLO ARENOSO PREPARADO POR VIA SECA.....	146
GRÁFICO 3 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA, ARGILA PREPARADA POR VIA ÚMIDA.....	149
GRÁFICO 4 - ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO 1, ARGILA (VIA SECA).....	163
GRÁFICO 5 - ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO 2, ARGILA (VIA ÚMIDA).....	163
GRÁFICO 6 - ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO 3, SOLO ARENOSO (VIA SECA).....	164
GRÁFICO 7 - ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO 1 E DE GRANULOMETRIA, ARGILA (VIA SECA).....	165
GRÁFICO 8 - ENSAIOS SEDIMENTOMÉTRICOS COMPARATIVOS (ENSAIO 2 E TESTE COM 15 g) E DE GRANULOMETRIA, ARGILA (VIA ÚMIDA).....	165
GRÁFICO 9 - ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO 3 E DE GRANULOMETRIA, SOLO ARENOSO (VIA SECA).....	167
GRÁFICO 10 - ENSAIO 1 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	174
GRÁFICO 11 - ENSAIO 2 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	175
GRÁFICO 12 - ENSAIO 3 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	176
GRÁFICO 13 - ENSAIO 5 DO FURO DE AGULHA, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA.....	178
GRÁFICO 14 - ENSAIO 8 DE FURO DE AGULHA, SOLO ARENOSO NA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO.....	181
GRÁFICO 15 - ENSAIO 9 DE FURO DE AGULHA, SOLO ARENOSO COM IMERSÃO PRÉVIA.....	182
GRÁFICO 16 - ENSAIO 2 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL, GRÁFICOS "VAZÃO VERSUS TEMPO" E "VAZÃO VERSUS CARGA HIDRÁULICA".....	183
GRÁFICO 17 - ENSAIOS DO FURO DE AGULHA, COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS 2 E 3 (ARGILA NA UMIDADE NATURAL), E 5 (ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA).....	184
GRÁFICO 18 - ENSAIOS DO FURO DE AGULHA, COMPARAÇÃO DO SOLO ARENOSO NA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO (8) E COM IMERSÃO PRÉVIA (9).....	185
GRÁFICO 19 - ENSAIOS DO FURO DE AGULHA, COMPARAÇÃO DA ARGILA NA UMIDADE NATURAL (2) E SOLO ARENOSO NA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO (8).....	186
GRÁFICO 20 - ENSAIO 1 INDERBITZEN, ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	188
GRÁFICO 21 - ENSAIO 2 INDERBITZEN, ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	189
GRÁFICO 22 - ENSAIO 3 INDERBITZEN, ARGILA NA UMIDADE HIGROSCÓPICA.....	190
GRÁFICO 23 - ENSAIO 4 INDERBITZEN, ARGILA NA UMIDADE HIGROSCÓPICA.....	191
GRÁFICO 24 - ENSAIO 5 INDERBITZEN, ARGILA NA UMIDADE HIGROSCÓPICA.....	192
GRÁFICO 25 - ENSAIO 6 INDERBITZEN, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA.....	193
GRÁFICO 26 - ENSAIO 7 INDERBITZEN, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA.....	194
GRÁFICO 27 - ENSAIO 8 INDERBITZEN PROLONGADO, 1ª PARTE, ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	195
GRÁFICO 28 - ENSAIO 8 INDERBITZEN PROLONGADO, 2ª PARTE, ARGILA NA UMIDADE HIGROSCÓPICA.....	196
GRÁFICO 29 - ENSAIO 9 INDERBITZEN, SOLO ARENOSO NA UMIDADE ÓTIMA.....	197
GRÁFICO 30 - ENSAIO 10 INDERBITZEN, SOLO ARENOSO NA UMIDADE HIGROSCÓPICA.....	198

GRÁFICO 31 - ENSAIO 10 INDERBITZEN PROLONGADO, GRANULOMETRIA DO MATERIAL ERODIDO, ARGILA NA UMIDADE NATURAL ( 1ª P.) E NA UMIDADE HIGROSCÓPICA (2ª P.).....	200
GRÁFICO 32 - ENSAIO INDERBITZEN, COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS 1 A 7 DA ARGILA.....	202
GRÁFICO 33 - ENSAIO INDERBITZEN, COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS 3 DA ARGILA E 10 DO SOLO ARENOSO.....	203
GRÁFICO 34 - ENSAIO 8 INDERBITZEN PROLONGADO, COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS PARTES.....	204
GRÁFICO 35 - ENSAIO INDERBITZEN, COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS 9 E 10 DO SOLO ARENOSO.....	205
GRÁFICO 36 - ENSAIO 1 INDERBITZEN MODIFICADO, ARGILA NA UMIDADE NATURAL ...	209
GRÁFICO 37 - ENSAIO 2 INDERBITZEN MODIFICADO, ARGILA RESSECADA.....	210
GRÁFICO 38 - ENSAIO 3 INDERBITZEN MODIFICADO, SOLO ARENOSO NA UMIDADE ÓTIMA.....	211
GRÁFICO 39 - ENSAIO 4 INDERBITZEN MODIFICADO, SOLO ARENOSO NA UMIDADE HIGROSCÓPICA.....	213
GRÁFICO 40 - ENSAIOS 3 E 4 INDERBITZEN MODIFICADO, GRANULOMETRIA DO MATERIAL ERODIDO DO SOLO ARENOSO NA UMIDADE ÓTIMA E NA UMIDADE HIGROSCÓPICA.....	214
GRÁFICO 41 - ENSAIOS 1 E 2 INDERBITZEN MODIFICADOS, COMPARAÇÃO DA ARGILA NA UMIDADE NATURAL E RESSECADA.....	215
GRÁFICO 42 - COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS INDERBITZEN 2 E 3, E INDERBITZEN MODIFICADO 1 E 2, DA ARGILA NAS UMIDADES NATURAL E HIGROSCÓPICA.....	216

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COEFICIENTE DE VISCOSIDADE DA ÁGUA.....	79
TABELA 2 - ENSAIO DO TORRÃO, DADOS E RESULTADOS.....	151
TABELA 3 - ENSAIO DO TORRÃO, SOLO ARENOSO, OBSERVAÇÕES EM TEMPOS DIVERSOS..	152
TABELA 4 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO DA ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	154
TABELA 5 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO DA ARGILA RESSECADA.....	154
TABELA 6 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 1ª PARTE, ARGILA UMIDADE NATURAL.....	155
TABELA 7 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 2ª PARTE, ARGILA RESSECADA.....	156
TABELA 8 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 1ª PARTE, ARGILA UMIDADE NATURAL.....	156
TABELA 9 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 2ª PARTE, ARGILA RESSECADA.....	157
TABELA 10 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 1ª PARTE, SOLO ARENOSO NA UMIDADE ÓTIMA.....	158
TABELA 11 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 2ª PARTE, SOLO ARENOSO RESSECADO.....	158
TABELA 12 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO DO SOLO ARENOSO RESSECADO .....	159
TABELA 13 - ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA INTERSTICIAL, DA ARGILA E DO SOLO ARENOSO.....	170
TABELA 14 - ENSAIO 1 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	173
TABELA 15 - ENSAIO 2 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	175
TABELA 16 - ENSAIO 3 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	176
TABELA 17 - ENSAIO 4 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL.....	177
TABELA 18 - ENSAIO 5 DO FURO DE AGULHA, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA.....	178
TABELA 19 - ENSAIO 6 DO FURO DE AGULHA, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA.....	179
TABELA 20 - ENSAIO 7 DO FURO DE AGULHA, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA.....	180
TABELA 21 - ENSAIO 8 DO FURO DE AGULHA, SOLO ARENOSO NA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO.....	181
TABELA 22 - ENSAIO 9 DO FURO DE AGULHA, SOLO ARENOSO COM IMERSÃO PRÉVIA.....	182

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	-	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BSI	-	<i>British Standard Institute</i>
CBR	-	<i>California Bearing Ratio</i>
CFA	-	<i>Continuous flight auger</i>
CI	-	Cromatógrafo iônico
CP	-	Corpo de prova
CPT	-	<i>Cone Penetration Test</i>
CPTu	-	<i>Cone Penetration Test</i> com medida de pressão neutra
CRD	-	Ensaio de adensamento edométrico de velocidade constante de deslocamento
CTC	-	Capacidade de Troca Catiônica
CTLE	-	Comissão Técnica de Laboratórios de Ensaios
DNER	-	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EA	-	Espectrofotômetro de absorção atômica
EDTA-Na	-	Sal di-sódio do ácido etileno-dinitrilo-tetra-acético-dihidrato
EMBRAPA	-	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	-	Organização das Nações Unidas Para a Agricultura e a Alimentação
GES	-	Grau de Erodibilidade do Solo
HRB	-	<i>Highway Research Board</i>
IA	-	Índice de atividade
INMETRO	-	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IP	-	Índice de plasticidade
ISO	-	<i>International Organization for Standardization</i>
ISSMFE	-	<i>International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering</i>
LACTEC	-	Instituto de Tecnologia Para o Desenvolvimento
LAME	-	Laboratório de Materiais e Estruturas
LL	-	Limite de liquidez
LNEC	-	Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de Portugal
LP	-	Limite de plasticidade
MCV	-	<i>Moisture condition value</i>
MCT	-	Miniatura, Compactado, Tropical (metodologia)
NBR	-	Norma Brasileira Registrada
NM	-	Norma Mercosul
PIEZ	-	Piezômetro
PMT	-	Pressiômetro
RBC	-	Rede Brasileira de Calibração
RBLE	-	Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios
RUSLE	-	<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>
SCS	-	<i>Soil Conservation Service</i>
SGQ	-	Sistema de Garantia da Qualidade
SPT	-	<i>Standard Penetration Test</i>
SPTT	-	Sondagem de simples reconhecimento com ensaios SPT e de torque
T/F	-	Titulação complexométrica e fotometria de chama
UFPR	-	Universidade Federal do Paraná
USDA	-	<i>United States Department of Agriculture</i>
USLE	-	<i>Universal Soil Loss Equation</i>
VIM	-	Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia
WEPP	-	<i>Water Erosion Prediction Project</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	-	porcentagem de partículas de argila no ensaio sedimentométrico comparativo
A	-	perda média anual de solo da USLE
AA	-	área do corpo de prova exposta à erosão
A <sub>2</sub>	-	% de partículas menores do que 0,002 mm
A <sub>5</sub>	-	% de partículas menores do que 0,005 mm
a	-	altura de queda das partículas
a	-	critério de avaliação indireta da erosão com base na granulometria
B	-	porcentagem de partículas de argila no ensaio de granulometria
β	-	coeficiente de eficiência de conversão de energia potencial em cinética
C	-	fator cultivo para cobertura e manejo do solo da USLE
Ca	-	quantidade de cátions de cálcio
d	-	diâmetro máximo das partículas
δ	-	densidade de massa dos grãos do solo
δ <sub>a</sub>	-	densidade de massa da água à temperatura de ensaio
δ <sub>c</sub>	-	densidade de massa da água à temperatura de calibração do densímetro
E	-	energia cinética proveniente da chuva
E <sub>cp</sub>	-	energia cinética das gotas da chuva no período e área consideradas
η	-	coeficiente de viscosidade da água à temperatura de ensaio
g	-	aceleração gravitacional
γ <sub>g</sub>	-	peso específico real dos sólidos
γ <sub>S máx</sub>	-	peso específico aparente seco máximo
h	-	umidade higroscópica da amostra
I	-	intensidade da chuva
K	-	quantidade de cátions de potássio
K	-	fator erodibilidade do solo da USLE
L	-	leitura do densímetro na suspensão
L	-	fator comprimento do talude da USLE; comprimento médio do talude
L <sub>a</sub>	-	leitura do densímetro em água destilada
M	-	massa de água
M <sub>h</sub>	-	massa do material úmido submetido ao ensaio
M <sub>i</sub>	-	massa de material retido acumulado em cada peneira
Mg	-	quantidade de cátions de magnésio
Na	-	quantidade de cátions de sódio
n	-	número de peneiras
P	-	fator prática de conservação do solo da USLE
PB	-	peso de solo no béquer após secagem em estufa
PP	-	peso calculado de solo que passa na peneira no intervalo
PR	-	peso do solo seco em estufa retido na peneira no intervalo
PU	-	perda unitária de solo
Q <sub>s</sub>	-	porcentagem de solo em suspensão
Q <sub>t</sub>	-	porcentagem de material passando em cada peneira;
R	-	fator erosividade da chuva da USLE
RAS	-	razão de absorção de sódio
RD	-	razão de dispersão
S	-	fator inclinação do talude da USLE
t	-	tempo de sedimentação correspondente a cada leitura densimétrica
TSD	-	total de sais dissolvidos
θ	-	inclinação do talude
V	-	volume da suspensão
V <sub>1</sub>	-	volume de água coletada na caixa no intervalo de tempo
V <sub>2</sub>	-	volume de água coletado no béquer.



- $V_2$  - volume de água coletado no béquer.  
 $We$  - fração do potencial energético convertida em trabalho erosivo  
 $W_{hig}$  - umidade higroscópica  
 $W_{nat}$  - umidade natural  
 $W_{ót}$  - umidade ótima  
 $y$  - porcentagens de grãos que passam nas peneiras 7, 14, 25, 50, 100 e 200

## RESUMO

Implementar metodologia laboratorial apropriada para analisar geotecnicamente o comportamento dos solos diante do fenômeno da erosão hídrica, é o objetivo principal desta dissertação. Adaptar tal metodologia para permitir o estudo da erodibilidade de solos regionais da Formação Guabirotuba, da região de Curitiba (PR), verificando as possibilidades de sua inserção em um sistema de garantia da qualidade de laboratórios de ensaios, são seus objetivos secundários.

São apresentadas as técnicas de laboratório mais freqüentemente utilizadas para caracterização do comportamento dos solos quanto a sua erodibilidade e, de forma mais detalhada, aquelas eleitas para implementação no laboratório de solos do Laboratório de Materiais e Estruturas-LAME, do Instituto de Tecnologia Para o Desenvolvimento-LACTEC, situado no Centro Politécnico, campus da Universidade Federal do Paraná-UFPR.

As adaptações necessárias para tornar os equipamentos e processos laboratoriais adequados ao estudo dos solos argilosos da Formação Guabirotuba, com suas características peculiares e comportamento complexo, estão descritas. Algumas inovações são introduzidas em procedimentos usuais, que podem ser propostas para utilização em outros solos. A apresentação inclui os cuidados e procedimentos que permitem inserir a metodologia em um sistema de garantia da qualidade, cujas exigências e preceitos básicos para laboratórios de ensaios estão também descritos.

Um conjunto de ensaios e análises, realizado em amostras de solo argiloso da Formação Guabirotuba e de um solo arenoso, com a finalidade de testar e comparar a aplicação das técnicas a solos diversos, está relatado. Trata-se de metodologia cujo emprego a esse solo argiloso ainda não consta da literatura. Embora sem a preocupação da confirmação de valores ou tratamento estatístico, devido a pequena quantidade de repetições, seus resultados trazem algumas idéias sobre o estudo geotécnico da erodibilidade dos solos argilosos da Formação Guabirotuba, importante unidade geológica da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR).

**Palavras-chave:** ensaios de erosão, erodibilidade, Formação Guabirotuba, solos regionais, sistema da qualidade em laboratório.

## ABSTRACT

The main objective of this work is to improve and implement an experimental methodology for geotechnical analysis of soil behavior due to water flow erosion. To adjust the method for soils of the Guabirotuba Geological Formation and to develop compatible procedures to the laboratories' quality assurance system are the other objectives.

The most commonly used techniques for soil erosion studies are presented, with emphasis on those chosen to be implemented in the Materials and Structures Laboratory, part of the Institute of Technology for Development, at the UFPR campus.

The required adjustments in the laboratory equipment and methods in order to fit the complex and peculiar clay soil behavior of the Guabirotuba formation are described. Some new ideas are incorporated to the usual procedures and can be extended to other soils. Procedures and precautions needed to adjust these methods to a laboratory quality assurance system are proposed.

An experimental work is carried out on clay and sand soil samples in order to verify the applicability of these techniques to different types of soils. There are no references available today about the application of this methodology to the Guabirotuba Formation soils. Regardless the limited number of samples tested, making a good statistical analysis impossible, the results do bring some new ideas about the water flow erosion in soils from this important local geological unit.

**Key words:** erosion tests, soil erosion, Guabirotuba Geological Formation, regional soils, laboratory quality assurance system.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao fenômeno natural e normal da erosão geológica, responsável em grande parte pela modelagem e relevo da superfície terrestre, contrapõe-se o problema da erosão acelerada, ocasionado pela ação antrópica. De graves consequências para a sociedade atual e as gerações futuras, tal problema constitui tema obrigatório de estudos e pesquisas em diversas áreas de conhecimento, entre as quais a geotecnia.

Com o desenvolvimento, nos últimos anos, da geotecnia ambiental, diversos tópicos da geotecnia tradicional passaram a ser predominantemente tratados sob essa nova ótica. Entre eles está o estudo da erosão nos solos. O enfoque da previsão e da antecipação, como forma de evitar problemas que freqüentemente apresentam consequências irreversíveis, prevalece atualmente sobre a geotecnia da remediação e do avanço baseado sobretudo em acidentes já ocorridos.

Com essa filosofia de trabalho adquire particular importância o desenvolvimento e a disseminação de metodologias experimentais de campo e laboratório, para prever o comportamento dos solos diante de fenômenos diversos, como no caso da erosão. Seus resultados podem e devem ser considerados como informações básicas para a elaboração de estudos e projetos de obras de engenharia, para planejamentos urbanos e rurais de uso e ocupação do solo, para realização de atividades agrícolas e de exploração mineral, para programas ambientais; em resumo, para intervenções humanas no meio ambiente.

Esta dissertação propõe metodologia relacionada a estudos da erodibilidade, isto é, do comportamento e da suscetibilidade de solos à erosão hídrica superficial, especialmente ao impacto e escoamento superficial da água de chuva. Está descrita a implementação em laboratório do LACTEC – Instituto de Tecnologia Para o Desenvolvimento e da Universidade Federal do Paraná, de métodos laboratoriais consagrados para estudos de erodibilidade de solos. Adaptações em equipamentos e procedimentos foram testados, para permitir sua aplicação a solos regionais de interesse. Tais estudos envolvem abordagens diversas: agronômica, geotécnica, hidráulica e geológica.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A erosão acelerada do solo é um grave problema ambiental e social. A esse fenômeno associam-se desastres, como: destruição e descaracterização de áreas urbanas e rurais; ruptura de taludes e encostas; assoreamento de corpos d'água naturais e de reservatórios de água em represas; danos a construções, estradas, ruas e instalações; perda de solos agrícolas e prejuízos à fauna e à flora.

Em comparação com a erosão normal, a erosão provocada por alterações nas condições climáticas ou geológicas, e a decorrente da intervenção do homem, é bastante acelerada, especialmente neste último caso. A erosão natural em geral se dá de forma suficientemente lenta para permitir a regeneração do terreno, através da formação de novas camadas de solo em substituição àquelas que estão sendo removidas e transportadas, o que não ocorre na erosão acelerada. Assim, esta pode ser diretamente relacionada com a escassez de alimentos e com a fome (FAO- Organização das Nações Unidas Para a Agricultura e a Alimentação, 1967), problema brasileiro e de diversas outras regiões do planeta, que está longe de ser resolvido. Os terrenos assim erodidos são improdutivos, fato que torna o controle da erosão fundamental para manter a produtividade agrícola. O agricultor não retira suficiente proveito da terra se esta desaparece devido a formação de sulcos e perde a fertilidade por erosão laminar. O solo que se perde por erosão é, muitas vezes, o mais fértil, o que contém os princípios nutritivos das plantas, o húmus e todas as contribuições que o agricultor aplicou. De todas as terras agrícolas do planeta, apenas uma pequena parcela pode ser dedicada à produção sem que sejam necessárias medidas de conservação de solo e de água. A grande maioria das áreas agrícolas é suscetível ao fenômeno da erosão.

Erosão geológica e erosão acelerada são tipos distintos de remoção do solo. Não distingui-los contribui para a criação de um clima de indiferença à gravidade dos danos da erosão e à importância dos programas de conservação. A erosão geológica é um processo normal, natural, sem influência do homem, que vem ocorrendo desde que os continentes surgiram do mar. É a ação da água, do vento, das variações de

temperatura, da atração gravitacional e das geleiras. Atuando ao longo dos tempos e em praticamente toda a superfície terrestre, a erosão pode ser considerada como um dos autores da modelagem do relevo, responsável por importantes mudanças morfogênicas, assim como o intemperismo, o vulcanismo e outros. Os geólogos consideram os sedimentos, especialmente os marinhos, como a documentação mais completa da história da Terra (POPP, 1998), o que evidencia a antiguidade e perenidade dos processos erosivos. Em alguns casos são ações lentas e, em outros, extremamente rápidas. De qualquer forma, fazem parte dos processos e ciclos naturais terrestres.

O manejo inadequado do solo pelo homem modifica esse e outros processos naturais, acelerando e facilitando a ocorrência de erosão. A erosão acelerada se superpõe à geológica, e deve-se à alteração da cobertura vegetal e das condições do solo, ao desmatamento e à exploração de recursos naturais, à preparação da terra para o cultivo e sua movimentação no local destinado a construções, à concentração e ao lançamento inadequado de fluxo de água ou outros efluentes, à modificação do traçado e da vazão dos cursos d'água, à ocupação de encostas, de fundos de vale e de regiões costeiras.

Portanto, controlar a erosão significa, acima de tudo, promover a conscientização e o manejo ambiental, adequando as ações antrópicas capazes de desencadear e facilitar os processos erosivos.

São bastante conhecidos os problemas de degradação ambiental associados à erosão hídrica no Estado do Paraná, especialmente em sua região Noroeste. Segundo Popp (1998), as perdas de terras cultiváveis no estado chegam a valores anuais de 40 toneladas por hectare. É nítida e evidente a relação da degradação com a atividade antrópica, como a construção de estradas e de núcleos urbanos, a agricultura e a pecuária. O êxodo rural, com todas as suas conseqüências negativas para o campo e a cidade, está diretamente ligado com a erosão (BIGARELLA e MAZUCHOWSKI, 1985). Nos arenitos predominantes na região noroeste do estado, formam-se voçorocas em áreas urbanas e rurais, muitas vezes com grandes dimensões e graves conseqüências sociais e econômicas. As soluções conhecidas e praticadas, como obras de

canalização, drenagem, barragens, estruturas para proteção e estabilização de encostas, geralmente envolvem custos elevados, tornando-se inviáveis para as prefeituras municipais. Além disso, são ações praticadas após o dano já ocorrido.

Curitiba e diversos municípios da Região Metropolitana são áreas, em grande parte, de ocorrência da Formação Guabirotuba. Os estudos e as observações de processos erosivos em evolução nos sedimentos desta formação geológica da Bacia Sedimentar de Curitiba, comprovam sua elevada suscetibilidade diante desse fenômeno. Os riscos ao ambiente e às comunidades assentadas em locais de terrenos suscetíveis à erosão aumentam em função do desconhecimento do problema pelos planejadores urbanos (FELIPE, 1999).

Caracterizar o comportamento dos solos diante da erosão e avaliar a sua erodibilidade, é uma contribuição que a engenharia ambiental pode dar. É preciso conhecer os processos qualitativa e quantitativamente, equacioná-los e determinar parâmetros, objetivando a prevenção e o controle da erosão para a conservação dos solos. Para evoluir nessas questões, é preciso desenvolver aplicações a solos e condições regionais, pois a heterogeneidade de materiais e suas características próprias inviabilizam as generalizações. É o caso da Formação Guabirotuba, que tem grande importância por sua predominância e sua relação direta com as atividades e assentamentos humanos na região onde se encontra. Os solos dessa formação geológica têm, muitas vezes, comportamento peculiar e complexo, exigindo estudos específicos para a evolução em seu conhecimento e compreensão. Poucos ainda são os estudos sobre a erodibilidade desses solos.

Como podem ser simulados e reproduzidos em laboratório os complexos processos que influenciam ou comandam a erosão hídrica em solos? Quais são os métodos e procedimentos disponíveis e utilizados para estudos de erosão em solos, ainda insuficientemente conhecidos e pouco empregados em pesquisas e em aplicações a problemas práticos? Quais dentre eles podem ser estendidos aos laboratórios de solos em geral, por sua simplicidade e reprodutibilidade, sem comprometimento da qualidade do estudo? Quais podem ser adaptados a estudos de solos de importância regional, com características peculiares e difícil manipulação em

campo e laboratório, como os solos argilosos rijos e duros da Formação Guabirotuba? Essas são algumas das dúvidas que a pesquisa busca esclarecer.

## 1.2 OBJETIVOS

A pesquisa tem como objetivo geral implementar estudos experimentais, envolvendo a erosão hídrica pluvial de solos de importância regional, através da implantação de metodologia adequada em laboratório.

Seus objetivos específicos são:

- pesquisar a metodologia experimental existente de caracterização de solos em laboratório para estudos de erodibilidade, selecionando as técnicas mais viáveis e adequadas e, tanto quanto possível, de uso inédito para o solo do estudo de caso;
- promover sua implantação em laboratórios do LACTEC e da UFPR, em condições de confiabilidade para servir de apoio a estudos, e
- realizar um estudo de caso a título de aplicação, de modo a obter alguns parâmetros de erodibilidade dos solos argilosos rijos da Formação Guabirotuba, mesmo que preliminares, sem a intenção de comprovar valores ou tratá-los estatisticamente.

## 1.3 ESCOPO DO TRABALHO

A dissertação é composta por 8 capítulos e 1 anexo, resumidos a seguir:

- o Capítulo 1 apresenta as justificativas e os objetivos da pesquisa realizada, bem como a estrutura do trabalho;
- o Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos sobre o fenômeno da erosão e seus mecanismos, erodibilidade dos solos e controle da erosão. Estabelecendo o tema em seu significado mais geral e amplo, definem-se os limites da pesquisa;



- o Capítulo 3 traz algumas informações sobre a geologia e a geotecnia da Formação Guabirotuba, destacando a erosão e a erodibilidade de seus solos argilosos rijos, que constituem o estudo de caso da metodologia proposta;
- o Capítulo 4 traz informações sobre a aplicação de sistemas de garantia da qualidade a laboratórios de ensaios e pesquisas, visando orientar a adaptação da metodologia proposta às suas condições e exigências;
- o Capítulo 5 cita os principais métodos e procedimentos para análise da erodibilidade de solos em laboratório, concluindo com a apresentação dos critérios de seleção e os métodos adotados na pesquisa;
- o Capítulo 6 apresenta detalhadamente a metodologia selecionada para constituir a presente pesquisa, bem como os procedimentos adotados em cada método, incluindo seu registro fotográfico. As descrições obedecem à seqüência recomendada em sistemas de garantia da qualidade, porém incluem muitas observações práticas resultantes da pesquisa. Também estão apresentados neste capítulo a relação e a descrição dos materiais e amostras utilizadas;
- o Capítulo 7 fornece os resultados dos ensaios e análises realizados, bem como sua discussão;
- o Capítulo 8 traz as conclusões da pesquisa e algumas sugestões para novos estudos.

Ao final estão apresentadas, em anexo, as planilhas para ensaios de erosão, elaboradas e adotadas na realização da parte experimental da pesquisa, em formato adequado para sua inserção em sistemas de garantia da qualidade.

## 2 EROSÃO HÍDRICA, ERODIBILIDADE E MÉTODOS DE CONTROLE

De modo a permitir o adequado tratamento e descrição da pesquisa procura-se, neste capítulo, visualizar o contexto geral no qual se insere o estudo e seus limites, fixar os conceitos básicos sobre o tema e estabelecer as denominações a serem utilizadas.

### 2.1 EROSÃO E ERODIBILIDADE

O processo erosivo pode ser considerado como a seqüência das ações de destacamento, transporte e sedimentação das partículas de solo. Com freqüência denomina-se erosão à desagregação, remoção, dissolução, desgaste ou ao destacamento de partículas do agregado de solo que é, na realidade, apenas o início do processo. Porém, em geral o nome é associado ao conjunto das ações de destacar, transportar e depositar as partículas.

Segundo D'Agostini (1999), "desagregar implica superar a coesão entre partículas do solo, de forma que possa ocorrer um deslocamento relativo entre partes contíguas. Transportar implica superar a inércia e a atração gravitacional que atua sobre a massa das partículas de solo transportáveis".

As classificações e os estudos de processos erosivos, freqüentemente tem como base o agente responsável por tais ações. Citam-se entre os agentes de destacamento e transporte especialmente o vento, a atração gravitacional em terrenos inclinados ou verticais, as geleiras e a água. A ação dos cursos d'água superficiais, combinada com o escoamento originado pelas chuvas, constitui o mais importante agente de erosão (ALMEIDA e RIBEIRO, 1998). A água em movimento é responsável pela maior quantidade de sedimentos transportados, bem como pela maior diversidade de origens e formas de atuação: impacto de gotas e escoamento superficial de chuvas, vazão normal e transbordamento de rios, águas provenientes de degelo de neve e geleiras, ondas, marés e correntes marinhas, variações sazonais de níveis em lagos, movimento de águas subterrâneas. É comum a combinação, concomitante ou não, de agentes como, por exemplo, a água lubrificando o contato entre dois horizontes do terreno, que

passam a escorregar em função da ação da gravidade no terreno inclinado. Ou ainda casos como o intemperismo, que pode reduzir grandes rochas a partículas menores, aptas a sofrer erosão por água, vento ou ação da gravidade. O intemperismo não é, a rigor, um processo de erosão, mas prepara a rocha para ser erodida. Além disso, a capacidade de provocar erosão de qualquer dos agentes citados, fica reforçada quando já contém partículas do material transportado. Pela simples constatação da diversidade de agentes, elementos e formas de ação envolvidas com a erosão, percebe-se a complexidade de seu estudo.

A erosão hídrica superficial dos solos pela ação da chuva, origina-se no impacto das gotas e no escoamento superficial de suas águas. Observa-se com frequência a importância da presença de outros fenômenos e mecanismos associados à presença das águas de chuva, como a ação combinada da gravidade, variações de umidade do solo antes e depois da chuva, entre outros. Quando se trata da erosão hídrica, costuma-se distinguir entre a erosividade, associada à capacidade da água em provocar a erosão, e a erodibilidade, considerada como a suscetibilidade do solo em sofrer sua ação. Segundo Bastos et al. (2001) a erodibilidade, entendida como a propriedade que retrata a facilidade com que partículas do solo são destacadas e transportadas, necessita de métodos adequados que a caracterize para fins de engenharia.

D'Agostini (1999) não considera a existência da desagregabilidade e da transportabilidade, ou seja, da erodibilidade, como uma propriedade do solo. Existe a capacidade da água de produzir desagregação e transporte, cuja ação depende da forma como a energia erosiva flui sobre o solo e do comportamento mecânico deste solo, determinando a eficiência da energia para se transformar em trabalho erosivo. Segundo o autor a erodibilidade não é uma propriedade do solo, pois o seu comportamento depende principalmente da atuação do homem sobre o ambiente.

De ambas as abordagens depreende-se a importância de conhecer fatores, processos e parâmetros, que auxiliem na compreensão e conhecimento do comportamento mecânico do solo diante da energia erosiva da água. Utiliza-se aqui o termo erodibilidade dos solos, bastante difundido e consagrado no meio técnico, como

o estudo desse comportamento. Tal conhecimento tem aplicação em estudos e projetos de ações antrópicas, que privilegiam os aspectos conservacionistas e a sustentabilidade. É de grande importância para a modelagem, para a seleção de materiais e de técnicas, para o planejamento e o manejo ambiental. A sua obtenção constitui, assim, uma das etapas do controle da erosão.

## 2.2 A EROSÃO HÍDRICA PLUVIAL

Entre os agentes básicos da erosão acelerada, destaca-se a ação da água. No caso de águas superficiais, especialmente as pluviais, é preciso definir as diferentes formas de ação da erosão, caracterizada como laminar, em sulcos e em voçorocas, além do transporte e sedimentação de partículas.

A erosão laminar é a remoção de uma lâmina delgada de solo da superfície de um terreno inclinado, podendo ocorrer de maneira uniforme ou não. Frequentemente fica caracterizada pela presença de manchas claras na superfície do solo, devido a retirada da lâmina escura que contém maior teor de matéria orgânica.

A erosão pluvial está inicialmente associada ao respingo ou impacto das gotas de chuva com a superfície do terreno, frequentemente denominado pelo nome em inglês "*splash*", e, na sequência, com seu escoamento superficial, também conhecido como "*runoff*". Com o impacto, as partículas elevam-se e deslocam-se horizontalmente. Em chuvas intensas, ocorre um trabalho enérgico e repetido de desintegração de agregados de solo e elevação de partículas. As partículas finas assim desagregadas, preenchem os poros do solo superficial e formam uma crosta, dificultando a infiltração e incrementando o "*runoff*".

Se a velocidade de queda de chuva é maior que a taxa de infiltração, a água começa a escoar sobre o terreno inclinado, provocando o transporte das partículas. O poder erosivo e de transporte do fluxo laminar, definido como o escoamento de partículas cujas trajetórias não se cortam, é função da altura da lâmina e da sua velocidade de escoamento, para um dado tamanho, forma e densidade das partículas

ou agregados do solo. O deslocamento máximo ocorre quando a altura do fluxo laminar é aproximadamente igual ao diâmetro das partículas (FAO, 1967).

Quando a superfície do terreno não é lisa e tampouco tem inclinação uniforme, condições normalmente encontradas em terrenos agrícolas, a água de chuva se concentra nas depressões e começa a fluir segundo a trajetória de menor resistência, ou seja, seguindo sulcos. A erosão em sulcos tende a ser maior do que a erosão laminar devido à diferença de velocidade, que pode chegar a algo em torno de 60 cm/s no primeiro caso e de 30 cm/s no segundo. No escoamento superficial o desprendimento de partículas e agregados origina-se da energia do fluxo. Como a energia do fluxo é proporcional ao quadrado da velocidade da água, ao dobrar a velocidade quadruplica o poder de desprendimento. Por sua vez, o transporte é proporcional à quinta potência da velocidade, fazendo com que a duplicação da velocidade, acima citada, proporcione um aumento do seu poder em 32 vezes (FAO, 1967).

A intensificação do processo de sulcamento do solo pela maior concentração do fluxo, leva à formação de ravinas. O caso particular de ravina em que existe presença e fluxo permanente de água, denomina-se voçoroca ou boçoroca. A voçoroca geralmente resulta do agravamento da erosão laminar e em sulcos, devido ao aumento de volume de água ou de sua velocidade. A voçoroca pode também resultar da água concentrada nos mesmos sulcos por tempo suficiente para aprofundá-los, ou ainda por ação de escoamentos subterrâneos. As ravinas são incisões menores no terreno, algo em torno de 50 centímetros, e as voçorocas são incisões com largura e profundidade superiores. Segundo esse conceito, o processo pode ser considerado como a evolução de sulco para ravina e, finalmente, para voçoroca (OLIVEIRA, 1999). Na realidade, a definição dos termos ravina e voçoroca é controversa.

No processo pode ocorrer o fenômeno de "*piping*", que pode ser a causa da formação ou aumento de voçorocas. Segundo Salomão (1999), a voçoroca e o "*piping*" resultam da ação não somente da água superficial, mas também de fluxos de água subsuperficiais, onde se inclui o lençol freático. O fenômeno denominado "*piping*" caracteriza-se pela remoção de partículas no interior do solo, formando canais em

forma de tubo ("*pipe*"), que evoluem no sentido de jusante para montante do fluxo, podendo dar origem a desabamentos e colapsos do terreno. Essa tem sido a causa de diversos acidentes em barragens de terra.

O critério de erodibilidade de Vertamatti e Araújo envolve a sucção do solo que anteriormente não havia sido contemplada em estudos geotécnicos sobre erosão (BASTOS, 1999). O conhecimento da sucção e da sua variação com a umidade é fundamental para realizar uma análise realista das condições de fluxo e infiltração de águas em encostas não saturadas (CAMPOS et al., 1992). A sucção está diretamente associada com a estabilidade de taludes naturais e com a ocorrência de erosão, e sua utilização iniciou com o desenvolvimento da geotecnia dos solos não saturados. Os estudos agronômicos envolvem, de longa data, os solos não saturados e a sucção. Trata-se de conceito de importância fundamental no estudo da sobrevivência e desenvolvimento das espécies vegetais, garantidos nos intervalos entre chuvas pela sucção ou capacidade de retenção de água pelo solo. Prevedello (1996) relaciona a tensão superficial e a ascensão de água em um tubo capilar, com os meniscos côncavos que se formam nas interfaces entre a água e as partículas sólidas de solos finos. Os raios de curvatura dos meniscos são tanto menores quanto menor for o conteúdo de água, o que significa que sob cada um dos meniscos atua uma pressão negativa. Por se manifestar como uma pressão superficial negativa próxima da superfície do solo não saturado, a sucção proporciona uma espécie de coesão entre as partículas de solo, que contribui com sua resistência à erosão. A redução da sucção, causada pelo aumento da umidade e da saturação do solo, pode ser a causa de erosão e de instabilidade de taludes.

No que se refere à sedimentação, os danos e prejuízos causados pela erosão acelerada podem ser enormes. Causa freqüentemente o assoreamento de corpos d'água, naturais como rios e lagos, ou artificiais como reservatórios e, ainda, de terras baixas ribeirinhas.

Araújo (2000), citando Wischmeier e Smith, apresenta a equação que relaciona energia cinética da chuva e sua intensidade:

$$E = 11,87 + 8,73 \log_{10} I \quad (1)$$

onde: E = energia cinética proveniente da chuva; I = intensidade da chuva.

De acordo com esse autor, a erosão por salpicamento das gotas de chuva parece ser mais importante, ao menos do ponto de vista da energia do processo, do que o escoamento superficial (*"runoff"*). As gotas de chuva tem velocidades da ordem de 600 a 900 cm/s, enquanto que as velocidades do fluxo superficial são de 30 a 60 cm/s.

Com a intensidade máxima da chuva ocorre o aumento da quantidade e do tamanho das gotas e, também, da energia cinética dela resultante. Nos estudos considera-se, geralmente, o efeito mútuo da energia cinética e da intensidade máxima da chuva.

No que se refere à infiltração da água no solo, D'Agostini (1999) considera que a maior permeabilidade do solo ao influxo de água reduz a quantidade de água que efetivamente escoar sobre o solo. Na água infiltrada ocorre intensa dissipação de energia no contato com um meio de elevada área superficial específica, e a energia mecânica adequada à produção de erosão é insuficiente para desencadear este fenômeno.

A infiltração da água no solo pode variar ao longo do evento pluviométrico. Ao estudar a dinâmica da água em solo não saturado Prevedello (1996), citando Horton, afirma que a redução na taxa de infiltração com o tempo depende de fatores associados à superfície do solo. Destaca o "selamento superficial" devido ao impacto das gotas de chuva, bem como fenômenos de expansão e contração do solo.

## 2.3 FATORES FÍSICOS

Os diversos fatores físicos que influem na erosão superficial dos solos provocada pela água da chuva, podem ser simplificada e agrupados em fisiografia, clima, solo e cobertura ou vegetação, a seguir descritos (FAO, 1967).

A inclinação, o comprimento e a curvatura do talude definem a fisiografia. A inclinação do terreno relaciona a erosão com o tamanho de partículas erodidas e com a possibilidade de formação de capas ou lâminas d'água na superfície, que dissipam a energia do impacto das gotas de chuva. A influência do comprimento do talude pode ser constatada pela perda unitária menor nas partes altas e maior nas partes baixas, o que conduz à solução do terraceamento como forma de redução da erosão. A curvatura do talude influi, pois as superfícies côncavas tem a inclinação reduzida na parte baixa, provocando menor erosão e mais sedimentação, embora haja o risco de formação de voçorocas devido à convergência da água. Nos taludes convexos a inclinação aumenta em sua parte inferior, aumentando a erosão e dificultando a sedimentação.

Os principais fatores relacionados com o clima são a chuva e a temperatura. A quantidade e a intensidade das chuvas são consideradas através do efeito mútuo da energia cinética e da intensidade máxima " $E \times I$ ", anteriormente citadas. A temperatura influi nas culturas que protegem o solo, na eficácia das chuvas, na maior velocidade de decomposição e conseqüente redução de matéria orgânica, na umidade dos solos e agregados, e na sua suscetibilidade à dispersão. Em sua interferência com a água, influi na viscosidade e na infiltração da água.

No fator solo estão reunidos o efeito das propriedades do solo que determinam a velocidade de infiltração da água de chuva e que determinam a resistência à erosão pelas gotas e pelo escoamento superficial.

Cobertura e vegetação têm efeito na interceptação da chuva e no decréscimo da velocidade do escoamento superficial. Mudanças no regime de escoamento superficial e subterrâneo são observadas como conseqüência do desmatamento e alteração nas



formas de uso do solo. As raízes também afetam propriedades do solo relacionadas com a erodibilidade.

## 2.4 PROCESSOS EROSIVOS

O processo erosivo causado pela água das chuvas tem abrangência em quase toda a superfície terrestre. O processo tende a acelerar com a ocupação urbana, com a abertura de estradas e instalações para transporte de água, energia elétrica, gás, petróleo e outros, com o desmatamento para exploração de madeira e produção agrícola.

O conhecimento do processo erosivo se reveste de grande importância para o estudo e o controle da erosão. Para evitá-la é preciso conhecer sua dinâmica como um todo e desde o início do processo, ou seja, a partir do momento em que as gotas de chuva começam a bater nos solos. Nesse momento, começa o *"splash"*, que pode causar a ruptura dos agregados, selando o topo do solo através da formação de crostas. Ocorre em seguida a infiltração de água e a formação de poças, à medida que o solo superficial torna-se saturado. A partir daí, com a dificuldade de infiltração a água começa a escoar na superfície originando o *"runoff"*, primeiramente em lençol com escoamento difuso, depois através de fluxos lineares concentrados, que evoluem para microrravinas (*"micro-rills"*). Algumas microrravinas podem formar cabeceiras que, ao se bifurcar, formam novas ravinas. Finalmente, as ravinas podem evoluir e se conectar com processos erosivos de maiores proporções, que são as voçorocas (GUERRA, 1999).

Em certos casos, além do conhecimento do processo erosivo genérico, outros fenômenos precisam ser considerados. Em solos argilosos, como os da Formação Guabirotuba, é importante considerar o "empastilhamento", a dispersão e variações superficiais relacionadas com a umidade, como redução de coesão superficial e de sucção, fenômenos descritos a seguir.

As argilas dispersivas sofrem erosão em um processo no qual suas partículas coloidais isoladas ficam em suspensão mesmo em águas sem movimentação. A erosão

nas argilas comuns requer considerável velocidade da água. A dispersão depende da química da argila e água (MITCHELL, 1993). Os solos dispersivos apresentam um teor de sódio solúvel na água intersticial mais elevado que o normal (SHERARD et al, 1976a). O sódio provoca uma tendência de aumento da espessura da camada dupla de água difusa que envolve as partículas de solos finos, daí resultando uma redução nas forças de atração entre partículas (ABNT, 1996c). A camada dupla forma-se quando a partícula de solo é imersa em água, provocando a separação dos íons de sua superfície, e tem influência direta nos fenômenos de floculação e dispersão (LAMBE e WHITMAN, 1976). Tentativas de caracterizar quantitativamente a estabilidade de um solo fino através da análise química da água presente em seus poros, conduz ao ensaio detalhado no item 6.2.4. Seu resultado baseia-se na determinação da quantidade total de sais dissolvidos (TSD), e da razão de absorção de sódio (RAS), que analisam relações entre as quantidades medidas dos cátions de cálcio, magnésio, sódio e potássio (SHERARD et al., 1976a; MITCHELL, 1993).

Bastos (1999) destaca que na pesquisa da erodibilidade de solos argilosos, os estudos sobre a dispersão dos solos ganham grande importância. A chamada erosão coloidal, gerada pela dispersão e transporte de argilas na água de percolação, é registrada em muitos casos históricos de obras de barragens, aterros e solos naturais, particularmente, na forma de túneis e ravinas profundas. Pesquisas têm procurado o desenvolvimento de critérios de erodibilidade a partir da caracterização da dispersibilidade de solos argilosos. Assume-se, por consenso, que a dispersibilidade das argilas não é reconhecida pelos ensaios de caracterização geotécnica correntemente empregados na prática de engenharia. Solos não dispersivos apresentam parâmetros críticos de fluxo bem definidos, abaixo dos quais as partículas resistem à erosão. Argilas dispersivas não registram essa situação limite, pois suas partículas entram em suspensão até mesmo em água parada. Logo, um solo argiloso dispersivo pode ser considerado aquele onde a tensão cisalhante hidráulica crítica é sempre zero. Assim, para que ocorra o destacamento de partículas e de agregados de um solo dispersivo não há necessidade de disponibilidade de energia erosiva na água.

O fenômeno de empastilhamento ou desagregação ("*slaking*") envolve a ciclagem, ou seja, a alternância do umedecimento e secagem do material. Alguns solos finos desagregam-se, na condição não confinada, forem submetidos à exposição ao ar, em seguida a sua imersão em água (MITCHELL, 1993). A variação da umidade superficial pode provocar o fendilhamento em grande escala e a completa desintegração da superfície do solo, formando plaquetas ou pastilhas. O processo envolvido é a hidratação de minerais expansivos. Trata-se de um processo muito ativo em clima úmido, associado a elevadas temperaturas e insolação direta, promovendo a ciclagem do solo ou rocha. O fenômeno de desagregação superficial tende à auto-estabilização, pois a própria camada de rocha desagregada protege o material subjacente da variação termo-higrométrica. Seu efeito dura enquanto a camada protetora não for removida por qualquer forma de erosão ou fluxo de água (INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998). Para o caso específico de taludes de rodovias, afirmam Rodrigues e Lopes (1998) que o processo de desagregação superficial em taludes ocorre notadamente nas rochas sedimentares, naturalmente laminadas, sendo mais característico dos tipos litológicos passíveis de se desagregarem superficialmente, quando submetidos a ciclos de umedecimento e secagem natural, originando um conjunto de pequenos grânulos subarredondados ou pastilhas que se desprendem do maciço e se acumulam na base do talude. O fenômeno de empastilhamento também é conhecido como erosão seca, pelo fato de poder ocorrer uma verdadeira erosão sem influência decisiva da água de escoamento superficial ou de contribuição subsuperficial. O fenômeno se intensifica com os ciclos sucessivos de chuva e estiagem, com a insolação nos taludes, proporcionando um conjunto de pequenas pastilhas, cujas dimensões variam desde 2 cm até as de areia fina ou silte. Ocorre na parte mais superficial do material, renovando-se continuamente com o deslizamento dos fragmentos, expondo nova superfície à continuidade do processo. Além de possibilitar a deflagração de escorregamentos ou queda de blocos, o fenômeno provoca o entupimento de canaletas de drenagem superficial, o que pode concorrer para instabilização de taludes.

Algumas pesquisas apontam para a relação entre erosão em solos finos e sua resistência ao cisalhamento, dada em função da coesão do solo na superfície. Bender (1985), estudando solos tropicais finos pouco coerentes, destaca que essa coesão superficial não é constante. Ela depende do estado de tensões e da umidade no início do processo erosivo, pois a infiltração de água pode alterar e fragilizar superficialmente o solo. Afirma o autor que características físicas não são suficientes para caracterizar a resistência à erosão pois ela depende, para os materiais de seu estudo, da estrutura do solo e do seu estado, isto é, das tensões efetivas, grau de saturação e adensamento. Conclui que a quantidade de saturações a que o solo fica exposto e a sua umidade no início da chuva, tem maior influência na erosão do que a duração da chuva. As relações entre erosão e coesão na superfície do solo são difíceis de estudar, sendo que os métodos usualmente utilizados para determinação da coesão não apresentam resultados representativos. O empastilhamento de solos argilosos coesivos expostos, faz com que o material passe a ter um comportamento superficial semelhante ao dos solos granulares (BASTOS, 1999).

Para o caso de taludes não submersos, a resistência ao cisalhamento dos solos é acrescida do eventual efeito de cimentação entre partículas e da sucção matricial. Segundo Fácio (1991), o fenômeno de desagregação de uma massa de solo é provavelmente provocado pela compressão do ar existente em seus vazios causada pela água que nela penetra. Mitchell (1993) complementa que essa compressão de ar pode ser responsável não apenas pela desagregação da massa de solo mas, em alguns casos, até por sua desagregação superficial. Portanto uma amostra de solo que não possua água livre, com o mesmo índice de vazios e com graus de saturação diferentes, apresentará erodibilidades também diferentes, tendo em vista que quanto menor for o grau de saturação maior será sua sucção, ou seja, a capacidade de absorção de água. Com o aumento da absorção de água ocorre a diminuição da coesão aparente e o incremento da compressão do ar existente em seus vazios, gerando assim uma pressão desagregadora na referida amostra.

A condição de solo não saturado, que é determinada pela presença de ar nos seus poros, afeta o fluxo de água através do maciço. Prevedello (1996), afirma que os

poros ocupados por ar reduzem a área efetiva ao fluxo, forçando-o a percorrer um caminho mais tortuoso. Como consequência, a condutividade hidráulica nesses solos é menor do que nos saturados, e depende do conteúdo de água ou da pressão da água nos meniscos dos poros.

Em certos casos, elevadas taxas de erosão tem sido observadas no início do evento erosivo, seja o impacto de gotas de chuva, seja o escoamento superficial de água. Diversos pesquisadores (e.g. BRASIL, 1979; FONSECA e FERREIRA, 1981; FÁCIO, 1991; LEMOS, 2002) constataam esse fato em testes de laboratório. Bastos (1999) cita o efeito dinâmico da primeira “onda de fluxo”, assim denominando o impacto da primeira frente de fluxo que percorre o canal hidráulico e atinge a amostra em ensaios de laboratório. Segundo o autor, tal efeito provoca erosão maior do que aquela que ocorre ao longo do ensaio.

A combinação dos diversos aspectos acima citados, relacionados com a umidade dos solos, pode estar na origem de fenômenos erosivos importantes, observados na natureza ou em laboratório. A ocorrência do efeito dinâmico da primeira onda de fluxo, simultaneamente com a nova hidratação de superfície ressecada que apresente empastilhamento e outros aspectos de solos não saturados, pode provocar uma sobreposição dos efeitos, exacerbando a suscetibilidade à erosão do material.

## 2.5 CONTROLE DE EROSÃO E CONSERVAÇÃO DOS SOLOS

A erosão é um fenômeno tão abrangente em sua ação e consequências, e tão diversificado em suas formas de ação, que as propostas e estudos de seu controle são complexos. Tal complexidade já provocou inúmeros insucessos, inclusive em alguns estudos e programas de grande vulto em termos de prazos, investimentos e esforços envolvidos.

Um bom exemplo é a questão de erosão urbana e rural. Ao se estudar os problemas e formas de controle, obviamente precisam ser tratados separadamente, pois são diferentes nas causas, nas formas de ação e nas consequências. Porém, ao se desenvolver e implantar o programa de controle da erosão, resultante do estudo

realizado, é indispensável que tenha âmbito regional, contemplando simultaneamente questões urbanas e rurais. Os problemas interagem e as soluções adotadas em uma área afetam a outra. O dinamismo do processo erosivo e de suas causas vem agravar ainda mais esta questão.

Tecnicamente é possível contornar tais dificuldades, ao menos em grande parte dos casos. Porém essas questões se agravam nos aspectos práticos políticos e institucionais. Os órgãos e instituições tem ação limitada, e as questões políticas e econômico-financeiras impedem o adequado desenvolvimento dos programas de combate e controle da erosão.

Bigarella e Mazuchowski (1985) propõem o controle da erosão em voçorocas já instaladas, nas estradas de rodagem e nas áreas urbanas, bem como na agricultura através de técnicas conservacionistas. Além disso propõem a integração cartográfica no planejamento ambiental, e enumeram os aspectos a contemplar nos estudos e planejamento: sócio-políticos, geológicos, climáticos atuais e pretéritos, vegetação, hidrológicos, geomorfológicos e pedológicos. Depreende-se daí que, como em todos os problemas ambientais, a solução aos problemas relacionados com a erosão tem um importante caráter multidisciplinar e interinstitucional.

Freqüentemente as questões financeiras determinam o controle a ser realizado. Por exemplo, nas terras novas destinadas ao cultivo agrícola deveriam ser realizados estudos prévios para determinar a natureza e características que podem indicar a suscetibilidade do terreno à erosão: tipos e textura dos solos, permeabilidade, inclinação, entre outras. Dependendo do resultado destes estudos, caberá questionar se as medidas de conservação necessárias serão demasiadamente caras para justificar a utilização do terreno para o cultivo (FAO, 1967).

## 2.6 PLANEJAMENTO AMBIENTAL E PLANIFICAÇÃO DO USO DO SOLO

As necessidades crescentes e a escassez dos recursos provocam o aumento da pressão das atividades humanas sobre o ambiente, com o progressivo esgotamento dos recursos naturais e a degradação do meio físico. Surge a necessidade de um

planejamento ambiental e uma planificação territorial, que tem como objeto a organização do espaço físico de modo que a utilização da terra seja compatível com as potencialidades do espaço. A visão preventiva dos problemas ambientais opera através da planificação, a qual pode ser considerada como a opção mais interessante e conveniente para o tratamento desses problemas, já que passa pela utilização sustentável dos recursos, por uma distribuição equilibrada da atividade humana no espaço, por uma regulação do uso do solo nesse mesmo espaço e pelo aproveitamento dos recursos do meio pelo homem, de acordo com a capacidade de cada ecossistema. Os estudos de planificação devem também levar em conta a possibilidade de usos diferentes do atual e das limitações que se impõem para cada um deles, incluindo-se a degradação das terras, consequência da erosão acelerada (MAFRA, 1999).

No processo de planificação de uso, a erosão passa a ser avaliada em três momentos e sob perspectivas distintas: na fase de inventário das condições físicas do território observando-se as manifestações visíveis das morfologias erosivas, na fase de avaliação de capacidade de uso como fator de limitação e, finalmente, no processo de planificação como um fator ligado à degradação das terras.

Para sua consideração como fator de limitação, a erodibilidade do solo pode ser avaliada e estimada por métodos práticos, baseados em parâmetros obtidos mediante determinações de laboratório. Deve ser analisada sob o ponto de vista da composição do perfil do solo, já que os mecanismos de infiltração, armazenamento e defluxo de água possuem uma estreita relação com as características do conjunto de horizontes superficiais e subsuperficiais (MAFRA, 1999).

## 2.7 PREVISÃO DE PERDA DE SOLOS E MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO

Os estudos sobre erosão foram desenvolvidos desde os anos 30, em particular os agrônômicos. Porém, foram aplicados principalmente a partir dos anos 60, quando passaram a basear-se em equações empíricas e modelos (D'AGOSTINI, 1999).

As equações empíricas para o cálculo das perdas de solo constituem um dos métodos mais utilizados na previsão da erosão. É um instrumento para estudos de

conservação de solos agrícolas, que servem para calcular as perdas médias anuais de solo em condições específicas. O especialista competente que trabalha no campo, utiliza as equações como guia para planejar o aproveitamento da terra e determinar as práticas de conservação do solo mais apropriadas para o terreno em estudo e para as necessidades do agricultor (FAO, 1967). É um modo de calcular a capacidade de produção de erosão das chuvas que presumivelmente cairão durante um ano.

A Equação Universal da Perda de Solos (USLE - "*Universal Soil Loss Equation*") do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), reflete a influência dos principais fatores na erosão provocada por chuvas. Posteriormente foi proposta uma revisão desta equação, denominada "*Revised Universal Soil Loss Equation*" (RUSLE). A equação da USLE é a seguinte (D'AGOSTINI, 1999):

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2)$$

onde:  $A$  = perda média anual de solo;  $R$  = fator erosividade da chuva;  $K$  = fator erodibilidade do solo;  $L$  = fator comprimento do talude;  $S$  = fator inclinação do talude;  $C$  = fator cultivo para cobertura e manejo do solo;  $P$  = fator prática de conservação do solo, como cultivo em terraços, em faixas, em curvas de nível.

Perdas de solos causadas por chuvas intensas nos terrenos cultivados, são diretamente proporcionais ao valor do efeito mútuo anteriormente citado, resultado do produto entre a energia cinética " $E$ " e a intensidade máxima da chuva em 30 minutos " $I$ ". A intensidade máxima pode ser calculada a partir de gráficos dos pluviógrafos, e a energia cinética determinada a partir da equação (1). Índice de erosão pluvial é a soma dos resultados dos produtos " $E \times I$ " das chuvas intensas que caem em um ano, em um determinado local. Alguns estudos (FAO, 1967) consideram como chuvas intensas aquelas com intensidade superior a 13 mm, computadas ao longo de muitos anos para a obtenção do fator " $R$ " da fórmula.

O fator erodibilidade do solo reflete o fato de que diferentes tipos de solos sofrem erosão com velocidade distinta, mesmo que os demais fatores permaneçam constantes. Entre as propriedades dos solos que tem influência no fator erodibilidade, destacam-se:



textura, magnitude e estabilidade da estrutura, tipo de argila e suas características químicas, permeabilidade e infiltração, umidade e sucção, conteúdo de matéria orgânica e espessura. Algumas “fases” de solos fortemente erodidas são mais suscetíveis a erosão do que as “fases” do mesmo solo pouco ou medianamente erodidas, ou vice-versa. Por esse motivo, algumas vezes atribuem-se fatores “*K*” diferentes para as fases erodidas e as relativamente não erodidas, com base em observações. O fator “*K*” representa a perda de solo em kN/ha, para fator chuva unitário, para um talude com declividade igual a 9% e comprimento de 22,1 m. São valores arbitrários e adotados como padrão e termo de comparação. Representam dimensões freqüentemente encontradas nos estudos em parcelas para obtenção dos dados de perda de solos, especialmente nos Estados Unidos. As parcelas são áreas delimitadas, preparadas e monitoradas para medir e avaliar as perdas de solo por erosão em taludes, decorrentes de chuvas naturais ou simuladas. Esse fator exprime a perda de solo em lavoura contínua sem a influência de cobertura vegetal ou qualquer ordenação, assim denominada a seqüência de cultivos selecionada para promover a conservação. Fatores “*K*” deduzidos de medições de perdas de solo conhecidas, à semelhança de retroanálises, servem de comparação e orientação na determinação dos fatores para outros solos. Geralmente os solos constituídos por areias grossas, permeáveis e profundos, bem como os solos pedregulhosos (ABNT, 1995), pertencem ao grupo de solos menos erodíveis. Os solos arenosos, grossos e médios (ABNT, 1995), pouco profundos e sobrejacentes a materiais rochosos ou argilosos de baixa permeabilidade, são freqüentemente os mais erodíveis. Assim, para cada grupo de solos com características semelhantes existente na região em estudo, define-se um fator erodibilidade. Entre outros procedimentos, o fator “*K*” tem sido obtido através de um nomograma (ISSMFE-*International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1985), de autoria de Wischmeier, Johnson e Cross. Seu uso requer cinco parâmetros do solo, de fácil determinação: porcentagem de silte e areia muito fina, porcentagem de areia, porcentagem de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade (ARAÚJO, 2000). Observa esse autor que seu uso é limitado por levar em conta poucas características dos solos. Além disso, afirma que é pouco confiável para solos com

características diferentes daquelas utilizadas em sua elaboração. Justifica assim a importância do estudo e avaliação das propriedades do solo que podem ter influência nos processos erosivos, de modo a permitir o tratamento do fenômeno de forma mais adequada.

A resolução da equação de perda de solo é facilitada combinando as equações do comprimento e da inclinação do talude constituindo, segundo Araújo (2000), um "fator topográfico". A relação " $S \times L$ " entre a perda de solo para o talude estudado e a perda para um talude com 9% de inclinação e comprimento de 22,1m, é o fator topográfico. O comprimento do talude é definido como a distância medida desde o ponto de origem do fluxo de água sobre o terreno, até: (a) o ponto onde a declividade diminui de tal modo que a sedimentação inicia, ou (b) até o ponto onde a água superficial penetra em um sulco bem definido. O valor fundamental para a equação da perda de solo é a perda média anual de um solo em lavoura contínua. Esse valor fundamental é estabelecido quantitativamente para condições reais determinadas pelo produto dos termos " $R$ ,  $K$ ,  $L$  e  $S$ ". Porém, quando um campo é cultivado reduz-se a perda, pois o cultivo proporciona uma certa proteção contra a erosão. Portanto, o valor cultivo e ordenação " $C$ " a ser empregado na equação, exprime a relação prevista entre a perda de solo em um terreno cultivado em condições específicas e a perda correspondente de solo em lavoura contínua.

O fator " $P$ ", que considera o efeito das diversas práticas conservacionistas sobre a erosão do solo pela água, é avaliado através de dados obtidos experimentalmente. Alguns valores encontrados na literatura (FAO, 1967) indicam, por exemplo, diferenças percentuais entre perdas por erosão que ocorrem nos terrenos com cultura em faixas e convencional. Segundo Salomão (1999), tais práticas podem ter caráter vegetativo, como a cultura em faixas, caráter edáfico, como o plantio direto, e caráter mecânico, como o plantio em contorno ou em nível.

Apesar de bastante difundida, especialmente no meio agrônomo, a USLE apresenta uma série de limitações relacionadas com o seu caráter empírico, por não considerar as leis físicas envolvidas no processo erosivo, por não se adaptar a erosão em voçorocas e a previsões durante eventos de chuva intensa (SANTOS, 1997).

Porém, apesar de suas limitações no aspecto quantitativo, a USLE permite identificar as perdas de solo em consequência de ocupações atuais e simular o comportamento frente a interferências futuras.

Diversos modelos surgiram posteriormente, para aperfeiçoar a USLE, ou permitir sua aplicação a casos específicos. No que se refere a erodibilidade, os novos modelos incorporam aspectos como, por exemplo, a erosão em sulcos e entre sulcos, a variação da erodibilidade com a época do ano e o clima correspondente (CHAVES, 1996).

Na década de 80 surgiu uma nova geração de modelos de previsão de perdas de solo, baseados nos processos erosivos. Tratam isoladamente do destacamento do solo e do transporte pelas gotas de chuva e pelo escoamento superficial. Dentre esses modelos modernos (BASTOS, 1999) destaca-se o "*Water Erosion Prediction Project*" (WEPP). Foi difundido pelo mundo como uma evolução dos modelos empíricos, para um modelo semi-determinístico com base na física dos processos. Reúne fundamentos de hidrologia, física do solo, fitotecnia, hidráulica e mecânica da erosão. O modelo segue uma nova tendência de abordagem, onde a erosão pela chuva é dividida em erosão entressulcos, resultante do destacamento e transporte das partículas de solo pelas gotas de chuva e fluxo superficial, e erosão em sulcos, resultante da ação da energia cisalhante do fluxo no leito dos sulcos. Chaves (1996) destaca que os estudos mais recentes de erodibilidade do solo para determinação de parâmetros a serem utilizados nos modelos de erosão, tomam por base principalmente resultados obtidos em parcelas experimentais. Portanto, observações de experimentos em campo têm predominado sobre análises laboratoriais.

Uma outra abordagem do problema é proposta por D'Agostini (1999), baseada nas relações entre trabalho e energia. Considera que a USLE e outros estudos indutivos observacionais, conceitualmente não satisfazem estas relações. Mesmo porque sua concepção empírica nunca pretendeu satisfazer tais premissas. Considera inadequado caracterizar os fatores da USLE como propriedades do sistema. São apenas termos ou expressões que surgiram como fatores empíricos, e que passaram a ter *status* de propriedade. Por exemplo, tomar o fator "K" como a propriedade da erodibilidade do solo, que pode ser quantitativamente avaliada como a vulnerabilidade

do solo à erosão em determinadas circunstâncias. Segundo o autor não é correto, partindo de equações empíricas, distinguir propriedades de sistemas fisicamente caracterizáveis. Essa é a razão da necessidade de se incluir complementos no conceito de erodibilidade como, por exemplo, a vulnerabilidade em determinadas circunstâncias. Uma propriedade do solo não tem sua existência condicionada a circunstâncias em que o sistema se encontra. A abordagem apresentada por D'Agostini, que privilegia o conceito de que a erosão é um trabalho e, como tal, decorre unicamente de um processo de conversão de energia mecânica, é aplicada através da equação (3):

$$We = \beta[E_{cp} + (M \times g \times L \times \sin^2 \theta)] \quad (3)$$

onde:  $We$  = fração do potencial energético convertida em trabalho erosivo;  $E_{cp}$  = energia cinética das gotas de chuva no período e na área considerada;  $M$  = massa de água, que é igual ao produto da lâmina precipitada pela área em que incide e pela massa específica da água;  $g$  = aceleração gravitacional;  $L$  = comprimento médio do talude, que corresponde ao deslocamento da água;  $\theta$  = inclinação do talude;  $\beta$  = coeficiente de eficiência de conversão de energia potencial em cinética, que é igual à relação entre a quantidade de trabalho erosivo e o potencial para produzir trabalho.

Porém, mais do que prever perdas de solo, o objetivo principal da abordagem de D'Agostini é comparar a eficiência, traduzida pelo coeficiente  $\beta$ , em diferentes condições. Por exemplo, eficiência em área dedicada a atividade agrícola, com e sem o manejo ambiental. O estudo transforma-se de uma previsão do resultado da utilização do solo, em uma forma de avaliar o desempenho de quem desenvolve esta atividade no meio ambiente (D'AGOSTINI, 1996). Trata-se de destacar a participação do homem, e de valorizar a adequação da atitude racionalizada frente às características do meio. O coeficiente  $\beta$  é, nas palavras do autor "uma quantificação da qualidade de relações do ser humano com o restante do meio, encerrando uma objetiva avaliação de desempenho ambiental" (D'AGOSTINI et al., 2001).

Qualquer que seja a abordagem, parece claro que a busca da compreensão dos fenômenos relacionados à erosão e o aprofundamento do conhecimento do

comportamento do solo envolvido no problema, são importantes. Seja para ajudar a definir parâmetros, como no caso do fator erodibilidade da USLE, seja para contribuir na definição da forma mais adequada de manejo, destacada na abordagem de D'Agostini (1999), o conhecimento que pode advir da pesquisa experimental tem interesse e aplicação. Em se tratando de uma orientação para definir formas de manejo, é importante que a metodologia permita simular, reproduzir e comparar experimentalmente diferentes condições naturais. No caso de definição de parâmetros, há que se tomar cuidado para que os mesmos sejam válidos também para as condições naturais a serem estudadas. Para os estudos em parcelas experimentais, a metodologia laboratorial pode contribuir identificando as condições mais desfavoráveis do solo que devem ser contempladas nos estudos de campo, entre outras aplicações.

Em seu relatório, o Comitê de Solos Tropicais da ISSMFE (1985), referindo-se ao teste de erosão Inderbitzen (ver capítulos 5, 6 e 7), destaca que sua utilização prática é difícil, apesar de resultados promissores. As dificuldades enumeradas, são: a necessidade de considerar diferentes umidades iniciais no solo, dificuldades em simular casos nos quais a sucção capilar é importante, dificuldades em simular o efeito de ciclos de secagem e umedecimento em solos expansivos, e a necessidade de estabelecer relações entre os resultados laboratoriais e o comportamento dos solos *in situ*. Constata-se a relevância desses aspectos nos estudos de erosão e a importância de considerá-los nas atividades de laboratório.

Com esses objetivos definidos, deve-se buscar a metodologia experimental mais apropriada a cada caso. A intenção não deve ser a de buscar uma precisão desnecessária com os resultados laboratoriais, mas responder ao essencial para a modelagem, a previsão ou o manejo. É preciso identificar as condições de maior risco para a intervenção a ser feita na natureza e para os solos existentes no local. Se a intervenção for feita de forma inadequada, qualquer que seja a abordagem do problema, servirá apenas para contabilizar *a posteriori* as perdas ambientais.

### 3 A FORMAÇÃO GUABIROTUBA

Amostras de solo argiloso rijo e duro, de cor predominantemente cinza clara, da Formação Guabirota, constituem o estudo de caso da pesquisa. Aspectos relacionados com a erosão dos solos argilosos da Formação Guabirota, estão descritos neste capítulo, partindo de informações gerais da formação geológica e de sua caracterização química, física, mineralógica e geotécnica.

A Formação Guabirota é constituída por sedimentos do Quaternário antigo, observados na região de Curitiba (SALAMUNI E SALAMUNI, 1999). Os autores consideram como estudos pioneiros sobre essa formação geológica, os trabalhos publicados pela Universidade Federal do Paraná entre 1957 e 1962, conduzidos por J. J. Bigarella, R. Salamuni e A. Ab'Saber. Desde então, diversos trabalhos fizeram evoluir de forma considerável, porém esporádica e lenta, o conhecimento sobre esta formação, dos pontos de vista da geologia, da pedologia, da geografia e da geotecnia. As necessidades e os problemas decorrentes do brusco crescimento populacional de Curitiba e Região Metropolitana, bem como as características e comportamento peculiares dos maciços da Formação Guabirota e seus materiais constituintes, levam ao desenvolvimento de estudos geológicos e geotécnicos (SALAMUNI, 1998). Visam, principalmente, as obras de engenharia, o planejamento urbano e as questões ambientais (KORMANN, NASCIMENTO E CHAMECKI, 1999a). Pesquisas geotécnicas envolvendo ensaios e análises de campo e laboratório, fundações de estruturas e obras de contenção, são realizadas no Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR (e.g. CHAMECKI et al., 1998; BOSZCZOWSKI, 2001; KORMANN, 2002).

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS GEOLÓGICOS

A região metropolitana de Curitiba situa-se, quase que totalmente, sobre uma bacia sedimentar que se estende por uma área de aproximadamente 3000 km<sup>2</sup>. A Bacia Sedimentar de Curitiba, situada entre a longitude 49°00' - 49°35' e a latitude 25°20' - 25°46', abrange Curitiba e parte da Região Metropolitana. A Formação Guabirota é

uma das unidades geológicas integrantes da Bacia de Curitiba, encontrada em quase toda a cidade de Curitiba e em partes de municípios vizinhos, como Pinhais, Piraquara, Campina Grande do Sul, Campo Largo, São José dos Pinhais, Colombo, Quatro Barras e Araucária, nos quais tem se desenvolvido importantes núcleos rurais e urbanos (BOSZCZOWSKI, 2001). Seus constituintes sedimentares estão depositados sobre rochas cristalinas do Complexo Atuba, que é o Complexo Costeiro Redefinido (SALAMUNI e SALAMUNI, 1999). Esse complexo é constituído essencialmente por migmatitos, observando-se também paragneisses, quartzitos, quartzo xistos, micaxistos, anfíbolitos e gnaisses-granitos. Afloramentos das rochas que originaram os sedimentos da Formação Guabirota, são eventualmente observados (BOSZCZOWSKI, 2001).

De acordo com Salamuni e Salamuni (1999), essa unidade geológica data do Terciário (médio a superior), do Mioceno ao Plioceno. Destacam os autores entre os aspectos fisiográficos da região, que as imagens revelam um terreno aplainado no sítio de Curitiba, sulcado pelos formadores da drenagem principal. As colinas geralmente são formadas por porções do embasamento cristalino aflorantes ou situadas em meio aos depósitos da Formação Guabirota. Complexos mecanismos atuaram na evolução geológica dos maciços da Formação Guabirota, entre os quais citam-se as trocas climáticas durante e após a sedimentação, tensões tectônicas, ciclos de ressecamento/umedecimento, consolidação, pressões horizontais elevadas e variação de pressões relacionadas a transporte de materiais (KORMANN, 1999; SALAMUNI e SALAMUNI, 1999).

Os sedimentos mais comumente encontrados na Formação Guabirota consistem em argilas siltosas ou siltes argilosos, denominados pelos geólogos como argilitos e pelos engenheiros geotécnicos como argilas rijas. Além da argila, outros tipos de materiais estão presentes na Formação Guabirota, caracterizando sua diversidade e heterogeneidade. São exemplos as areias arcólicas, os depósitos rudáceos conglomeráticos e os depósitos carbonáticos ou caliches. Todas essas litologias foram descritas como materiais inconsolidados ou endurecidos por soluções de carbonato de cálcio (SALAMUNI e SALAMUNI, 1999).

A posição do nível do lençol freático é variável na Formação Guabirotuba, podendo ser encontrado próximo da superfície ou em profundidades de até 15 m. Com frequência observa-se a presença de aquíferos suspensos, formados devido à baixa permeabilidade da matriz da argila rija (KORMANN, 1999).

Salamuni e Salamuni (1999) citam trabalho de R. Becker de 1982, que subdividiu e redefiniu a Formação Guabirotuba, denominando de Formação Tinguís a porção superior do pacote sedimentar. Essa porção é constituída por sedimentos arenosos, arcóseos e siltico-argilosos, da própria Formação Guabirotuba, retrabalhados em clima semi-árido.

Apesar da controvérsia que ainda envolve a distinção entre as duas formações, do ponto de vista geotécnico a separação é justificada e conveniente, pois os comportamentos de seus materiais constituintes são diversos (KORMANN, 2002).

Kormann (2002) compara a gênese e a geologia da Bacia de Curitiba, com outras unidades sedimentares do sudeste do Brasil como, por exemplo, as bacias de São Paulo, Taubaté, Resende, Volta Redonda e Itaboraí. Através da possível gênese comum, o autor aponta semelhanças de comportamento geotécnico entre os solos dessas unidades.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGILAS RIJAS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA

As argilas rijas da Formação Guabirotuba possuem uma coloração cinza, cinza esverdeada ou marrom, e frequentemente apresentam consistência elevada, rija ou dura, sendo por isso denominadas de argilas rijas (KORMANN, 1999). Estas argilas rijas são conhecidas popularmente como “sabão de caboclo”, pelo fato de tornarem-se lisas e escorregadias quando umedecidas. Ao entrar em contato direto com a atmosfera, um processo de ressecamento com a conseqüente redução volumétrica do solo se manifesta, conferindo ao material um aspecto “empastilhado”, elemento fundamental no estudo de sua erodibilidade. Diversos autores (KORMANN, 2002; BOSZCZOWSKI, 2001; DUARTE, 1999; PEREIRA e PEJON, 1999; SIEDLECKI e FIORI, 1999) apresentam dados de análises mineralógicas que permitem caracterizar a



predominância de um argilo-mineral do grupo das esmectitas, que poderia ser a montmorilonita (MASSAD et al., 1981). Embora em superfície os sedimentos intemperizados apresentem características preferencialmente associadas à caulinita (BOSZCZOWSKI, 2001), análises mineralógicas através da difratometria de raios-x (DUARTE, 1986) mostram que na fração argila dos sedimentos não intemperizados ocorre a predominância da montmorilonita (80%), em relação à caulinita (10%) e à illita (10%). Essa é a causa da ocorrência de solos expansivos e do conseqüente empastilhamento (*slaking*) dos solos da Formação Guabirotuba ao sofrer ressecamento. Apesar da presença dos argilo-minerais que conferem ao solo características de expansão, contração e higroscopia, tais processos de variação volumétrica não se manifestam quando o solo se encontra em sua condição natural, confinado por camadas de solo superficial e protegido por vegetação. Nessas condições, sua umidade natural pouco se altera em decorrência de variações climáticas (BOSZCZOWSKI, 2001). Porém, esses processos podem ocorrer intensamente quando o solo fica exposto, desprotegido e desconfinado.

Análises químicas de água intersticial de argila rija dessa formação provenientes de Campina Grande do Sul, apontaram o cálcio como cátion principal (SIEDLECKI e FIORI, 1999). A mesma análise em amostras provenientes de Araucária, indicaram um elevado teor de sódio (MASSAD et al., 1981), fato que também pode constituir um aspecto importante no estudo desse material frente a erosão hídrica. Pereira e Pejon (1999) apresentam valores de capacidade de troca catiônica (CTC) para a fração argila (49,79 a 121,0 cmol/kg), que indicam o predomínio de argilo-minerais com elevadas CTC e superfície específica (403,30 a 945,00 m<sup>2</sup>/g).

A umidade natural dessa argila é normalmente elevada, com valor médio de aproximadamente 32% e, em conseqüência, também o grau de saturação é alto, com o valor médio próximo de 94%. Essa característica pode ser associada ao fenômeno de ascensão capilar, bem como às condições climáticas regionais, com precipitação pluviométrica anual da ordem de 1200 a 2100 mm (KORMANN, 2002).

Mesmo com alto grau de saturação, a argila rija pode apresentar elevados níveis de sucção matricial, que interfere diretamente nas tensões efetivas e no comportamento

do solo no que se refere à erosão. Kormann (2002), apresenta um programa de determinação de curvas características e de valores de sucção de amostras na umidade natural, para as argilas rijas da Formação Guabirotuba. Para umidade natural variando de 21,4% a 25,7%, com grau de saturação de 84% a 98%, obteve sucções variando entre 1600 e 2500 kPa.

A consistência elevada, que caracteriza a argila como rija e dura, é traduzida, nos trabalhos rotineiros de obras de engenharia, por meio dos ensaios de campo SPT–*Standard Penetration Test*, realizados a cada metro de perfuração nas sondagens à percussão. São freqüentes os resultados com valores elevados, incluindo diversas regiões com SPT igual a 20 ou mais já nos primeiros ensaios, onde a argila é encontrada próxima da superfície (CHAMECKI et al., 1998; KORMANN, 2002).

Kormann (2002), a partir de extenso levantamento de parâmetros geotécnicos obtidos em diversos trabalhos (e.g. MASSAD et al., 1981; DUARTE, 1986; NASCIMENTO, 1992; NASCIMENTO et al., 1994; CHAMECKI et al., 1998; BOSZCZOWSKI, 2001), apresenta um ótimo resumo de valores médios que ajudam a caracterizar a argila rija. Sua granulometria é predominantemente argilosa (20 a 78%), com frações silte (12 a 53%) e areia (3 a 53%). Os limites de Atterberg indicam valores de limite de liquidez e de plasticidade da ordem de 73% e 30%, respectivamente. O índice de plasticidade médio é da ordem de 43%. Sua classificação geotécnica mais freqüente, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos é CH, argila inorgânica de alta plasticidade. O peso específico natural médio situa-se em torno de 18,4 kN/m<sup>3</sup> e o peso específico real das partículas sólidas em torno de 26,5 kN/m<sup>3</sup>. O índice de vazios médio é da ordem de 0,9, porém encontram-se eventualmente valores próximos ou superiores a 1,0. O índice de atividade em geral resulta dentro da categoria denominada normal, com valores entre 0,75 e 1,25.

Outra característica da argila rija, de grande importância geotécnica pois está associada a problemas freqüentemente observados em obras de escavações e taludes, é a presença de descontinuidades. Podem ser subdivididas em superfícies polidas (*"slickensides"*) e fraturamentos, e sua origem ainda é motivo de hipóteses e pesquisas. Como salienta Boszczowski (2001), as pequenas juntas e fissuras com espaçamento da

ordem de centímetros ou decímetros, são dificilmente perceptíveis na massa de solo intacto. No entanto estão presentes em toda a formação de forma aleatória, ou seja, não apresentam orientação preferencial. Pesquisas recentes (ANTONIUTTI et al, 1999; KORMANN, 1999; KORMANN et al., 1999a; KORMANN et al., 1999c; BOSZCZOWSKI, 2001; KORMANN, 2002) confirmam a importância desse sistema de fraturas no comportamento mecânico das argilas rijas da Formação Guabirotuba, por constituírem planos preferenciais de ruptura. As pesquisas apontam para a possibilidade do comportamento do maciço como meio rígido fraturado. Em função de sua intensidade e direcionamento predominante em cada local, as fraturas poderiam chegar a controlar as características geotécnicas como, por exemplo, reduzir a resistência ao cisalhamento e aumentar a permeabilidade. Assim, as obras de engenharia como fundações, escavações e contenções, seriam fortemente influenciadas pelas descontinuidades. Os resultados de ensaios de campo e de laboratório realizados nas argilas rijas da Formação Guabirotuba tendem a apresentar um importante componente associado ao efeito escala. Quanto maior o volume ou a superfície submetida ao ensaio, maior a presença de fraturas e superfícies polidas na amostra e, conseqüentemente, maior sua influência no resultado. Esse fato foi considerado nos ensaios realizados para a pesquisa, conforme relatado e analisado nos capítulos 5, 6 e 7.

Também constituem características de interesse para o entendimento do comportamento mecânico das argilas rijas, e são objeto de pesquisas recentes ou em andamento (BOSZCZOWSKI, 2001; KORMANN, 2002), o sobre-adensamento, a cimentação e as tensões horizontais elevadas, entre outras.

Para dar uma idéia desses parâmetros geomecânicos da argila rija da Formação Guabirotuba, citam-se alguns dos resultados (valores médios) apresentados por Boszczowski (2001), obtidos em ensaios com amostra indeformada proveniente da mesma área utilizada na presente pesquisa, a Área 1 do Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR. Ensaio de adensamento edométrico de velocidade constante de deslocamento (CRD), em solo com índice de vazios inicial de 0,669 e peso específico natural de 20,28 kN/m<sup>3</sup>, resultaram em pressão de pré-adensamento vertical de 980 kPa e horizontal de 1030 kPa. Ensaio de adensamento edométrico convencional da

mesma amostra, resultou em pressão de pré-adensamento vertical de 2800 kPa determinada, como as anteriores, pelo método Pacheco Silva. O índice de compressão resultou 0,113 para os ensaios CRD e 0,191 para ensaio convencional, e os índices de expansão 0,025 e 0,037, respectivamente. Os ensaios triaxiais convencionais foram de deformação controlada, não drenados, com velocidade de cisalhamento igual a 0,003 mm/min, em corpos de prova adensados isotropicamente a tensões de confinamento efetivas iniciais entre 189 e 579 kPa. Os parâmetros efetivos de resistência médios entre os ensaios realizados foram ângulo de atrito  $25^\circ$  e coesão 35 kPa. Porém, conforme citado acima, Kormann (2002) com base em resultados de ensaios de campo e laboratório realizados para analisar o efeito escala, obteve valores significativamente reduzidos, chegando até a coesão nula por influência das descontinuidades do material.

### 3.3 EROSÃO E ERODIBILIDADE NA FORMAÇÃO GUABIROTUBA

Apesar da freqüente observação da ocorrência do fenômeno da erosão na Formação Guabirotuba (Figura 1), ainda são poucos os estudos específicos publicados a esse respeito.

FIGURA 1 – EROSÃO EM TALUDE NA ARGILA RIJA DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA



Segundo Felipe (1999), a elevada suscetibilidade à erosão dos sedimentos expansivos e retrativos da Formação Guabirotuba, traz grandes riscos às comunidades assentadas em suas áreas de ocorrência, com prejuízos materiais e sérios danos ao meio ambiente. Os materiais designados por argilas rijas no item anterior, são descritos por este autor como argila de cor cinza esverdeada, com permeabilidade muito baixa, da ordem de  $10^{-5}$  cm/s, e espessura variável, de 1,0 a mais de 50,0 m. Tem como argilo-mineral predominante a esmectita 2:1 e, em menor proporção, illita e caulinita.

Segundo Kormann (1999), a predominância de argilo-minerais do grupo das esmectitas, com grande probabilidade de presença de montmorilonita, confere a estes solos sua característica da expansividade. Tal característica, associada com as constantes variações de umidade na superfície, constituem o fator que controla e desencadeia processos erosivos intensos nestes solos, quando expostos à ação das águas superficiais. Com o ressecamento ocorre o empastilhamento superficial do solo que, ao entrar novamente em contato com a água se desagrega, iniciando um processo erosivo. Felipe (1999) também destaca suas características de expansividade, empastilhamento, trincas profundas em forma conchoidal e comportamento não laterítico. Afirma que sua erodibilidade em talude é muito alta, confirmada através de testes em campo. Ao contrário das argilas, os arcósios e cascalhos da mesma formação são pouco erosivos.

Nas condições em que estas argilas rijas se encontram na natureza, recobertas por solo caulinítico estável, mantém-se com sua umidade natural sem manifestar instabilidade. Com a retirada da camada superficial, que freqüentemente ocorre em movimentação de terra para obras de engenharia ou atividades agrícolas, a argila exposta perde água e se retrai, apresenta empastilhamento e trincas características. Com a água de chuva a argila se hidrata novamente, expande e desagrega. Forma assim um leito centimétrico de lama, por toda a superfície exposta de partículas finas. Este material, sob a ação de escoamento superficial é facilmente transportado, dando origem à erosão laminar ou em sulcos. Não são raras as observações, em Curitiba ou seus arredores, de intensos processos erosivos nas argilas rijas da Formação

Guabirotuba. A formação de sulcos, ravinas e, até mesmo, voçorocas, resulta de significativas remoções e perdas de solo por ação da erosão hídrica pluvial. Nas condições de empastilhamento das argilas, o destacamento das partículas se dá mais por absorção de água pelas argilas, do que propriamente pelo impacto direto das gotas de chuva (FELIPE, 1999). Somente a adequada proteção da superfície, que fica exposta quando da remoção do solo, pode evitar o início do processo erosivo.

Pereira e Pejon (1999) analisam o mesmo processo de empastilhamento destas argilas e suas conseqüências, sob o enfoque de sua expansibilidade. Através de trabalhos de campo e de laboratório buscam estabelecer zonas mais suscetíveis aos problemas causados pela expansão destes materiais, de modo a permitir a elaboração de uma Carta de Predisposição para a região do estudo.

Hach-Hach e Lima (1999), apresentam metodologia para qualificação e monitoramento dos riscos geológicos representativos, através de fotografias aéreas e terrestres, registros de eventos em jornais, documentos cartográficos, ensaios geotécnicos SPT, profundidade do lençol freático em poços rasos e profundos, dados geológicos e geotécnicos. Quando aplicada à Formação Guabirotuba, a metodologia identifica inundações, alagamentos e subsidências. Porém, de forma mais significativa, detecta feições erosivas e risco de movimentos de massa gravitacionais.

Siedlecki e Fiori (1999), ao estudar a interação do comportamento geotécnico dos solos da Formação Guabirotuba com soluções contaminantes presentes em efluentes industriais destacam, entre outras características estudadas em laboratório, a erodibilidade destes solos. Apontam as vantagens em empregar o método de análise proposto por Nogami e Villibor em 1979, devido a facilidade e rapidez de execução, uso de equipamentos simples e consideração do efeito de secagem. O método baseia-se nos ensaios de avaliação da absorção de água e perda de peso por imersão.

Felipe (1999) apresenta resultados desses e de outros ensaios realizados em amostras de solos da Formação Guabirotuba. Conclui recomendando às administrações dos municípios situados na região de ocorrência desta formação, a realização de estudos de caracterização do meio físico, para permitir o mapeamento e localização de afloramento da Formação Guabirotuba. Tal procedimento permitiria

planejar as ações antrópicas através de planos diretores, de leis sobre parcelamento e uso do solo e de código de obras, contendo medidas preventivas de controle da erosão.

### 3.4 CARACTERÍSTICAS DE INTERESSE PARA A PESQUISA

Das características dos solos da Formação Guabirotuba que constituem o estudo de caso, resumidamente descritas neste capítulo, convém reter aquelas de interesse para a pesquisa. São as características que influem diretamente no comportamento relacionado à erosão, estudado através das análises e ensaios, bem como aquelas que podem constituir dificuldades para a adequada realização das atividades de laboratório. Tais características, combinadas aos processos erosivos descritos no item 2.4 do capítulo anterior, permitiram estabelecer a metodologia empregada na parte experimental da pesquisa.

Por se tratarem de solos predominantemente argilosos e rijos, com evidências de presença significativa de argilo-minerais expansivos, a possibilidade de desagregação como elemento do processo de erosão precisa ser considerada.

Devido aos mesmos motivos, granulometria fina e expansibilidade, bem como pela constante observação de empastilhamento ("*slaking*") em superfícies expostas e passíveis de sofrer ciclos de variação de umidade e sucção, são indispensáveis análises para envolver tais variações e simular essas condições.

Os percentuais representativos de sódio em análises químicas de seus componentes e água intersticial, associados à predominância argilosa das partículas sólidas do solo em questão, apontam para o interesse da avaliação de sua dispersibilidade e erosão interna ("*piping*"). Análises química e granulométrica específicas para avaliação da dispersibilidade dos solos, também são recomendáveis.

A argila estudada apresenta-se na natureza com a consistência predominantemente rija, porém com seu comportamento mecânico influenciado por descontinuidades, devido a presença das fraturas e superfícies polidas características. Ensaios e análises que permitam manter ou simular as condições naturais e o efeito escala, merecem ser considerados na metodologia.

#### 4 SISTEMA DA QUALIDADE EM LABORATÓRIOS DE ENSAIOS

Observa-se atualmente o engajamento generalizado das empresas na implantação de um Sistema de Garantia da Qualidade (SGQ). Com tal iniciativa, visam a melhoria da qualidade e o incremento da produtividade em suas atividades, bem como a obtenção de certificação reconhecida nacional e internacionalmente para seus serviços ou produtos. Trata-se de uma necessidade operacional das empresas, mas também, estratégica, pois as certificações são freqüentemente exigidas em contratações e concorrências.

Laboratórios de ensaios e pesquisas, apesar da complexidade e diversidade de suas atividades e operações, buscam participar desse engajamento. O LAME, que é parte integrante do LACTEC, em cujo laboratório de geotecnia concentraram-se as atividades experimentais da presente pesquisa, mantém há alguns anos a certificação ISO 9002, conforme a *International Organization for Standardization* (ISO). Além disso, amplia constantemente o credenciamento junto ao Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), para diversos ensaios e análises relacionados com todas as suas áreas de atividade: materiais de construção, estruturas civis e geotecnia.

A pesquisa constitui o desenvolvimento de uma metodologia experimental, implementada em laboratório que desenvolve suas atividades conforme os padrões e exigências da certificação internacional da qualidade. Assim, esse aspecto deveria ser contemplado na pesquisa. Consiste, inicialmente, em atender, tanto quanto possível em uma pesquisa, os requisitos do SGQ na preparação, realização e registro das atividades em laboratório. Finalmente, trata-se de elaborar documentação, como procedimentos e planilhas, que facilitem a incorporação da metodologia à rotina desse ou de outros laboratórios com interesse em sistemas da qualidade.



#### 4.1 CONCEITOS BÁSICOS DO SISTEMA DE GARANTIA DA QUALIDADE

Qualidade de um produto ou serviço é a aptidão para satisfazer as necessidades dos clientes, no que se refere à totalidade de suas propriedades e características (GOMES et al., 2001). A qualidade de um produto esteve sempre associada ao entendimento de o produto ser apropriado para seu uso. A noção de qualidade como elemento inerente ao processo de produção do qual o produto se origina, surgiu com a revolução industrial e a produção em cadeia. Na década de 30 começa a ser aplicado o sistema da qualidade, como um conjunto sistemático de ações destinadas a verificar se um produto ou serviço cumpre com especificações preestabelecidas, dentro de parâmetros de variação conhecidos (ROSENBERG e SILVA, 1999).

Através da evolução dos sistemas da qualidade, percebe-se no seu desenvolvimento duas vertentes conceituais. Uma fundamentada no objetivo de produzir sem defeitos, portanto com foco no produto, e a outra direcionada a satisfazer as necessidades dos clientes, ou seja, cujo objetivo é o usuário. O termo qualidade poderia ser aplicado a dois usos principais, como grau de excelência e como conformidade com os requisitos (ROSENBERG e SILVA, 1999).

Entre os aspectos principais do SGQ estão o compromisso da gerência do laboratório, a designação e formação dos facilitadores, a criação do departamento ou área da qualidade, os manuais, os registros e evidências, os procedimentos, as calibrações, as auditorias e os programas interlaboratoriais. Cada um desses aspectos está resumidamente descrito a seguir.

O processo inicia com a decisão da administração do laboratório em estabelecer um sistema interno de garantia da qualidade, assumindo o compromisso de participar e investir nas ações necessárias (ROSENBERG e SILVA, 1999). O passo seguinte é a designação de funcionários e seu treinamento para exercer as funções de facilitadores e de auditores do SGQ, criando um departamento ou área própria para este fim. Podem ser funcionários do laboratório, ou pessoas contratadas especialmente para tais atividades. Além da fiscalização e orientação das atividades do SGQ, são os

responsáveis por auditorias internas e pelo acompanhamento de auditorias externas, como as realizadas pelo INMETRO ou pela instituição representante da certificação segundo as normas ISO. Participação em cursos de atualização e reuniões da Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios (RBLE), ou da Rede Brasileira de Calibração (RBC), conforme o caso, são atividades freqüentes dos responsáveis por departamentos da qualidade nos laboratórios. Cada departamento técnico ou administrativo do laboratório designa um de seus funcionários, para liderar e participar das reuniões e outras atividades relacionadas ao SGQ, como representante do seu departamento.

Os facilitadores e a direção do laboratório estabelecem a política da qualidade, bem como a missão e a visão do laboratório, como um compromisso da instituição. Em seguida ocorre a elaboração e implementação de manuais descrevendo o funcionamento das áreas administrativas e técnicas, com destaque para a área própria do SGQ. Devem constar, entre outras informações, a descrição das atividades, nome e função das pessoas, previsão de despesas, receitas e fontes dos recursos financeiros necessários, formas de atendimento da missão e da política da qualidade do laboratório. Os facilitadores elaboram o manual da qualidade de todo o laboratório e mobilizam os gerentes e o representante de cada departamento do laboratório para auxiliar na redação dos respectivos manuais operacionais. Esses manuais do SGQ passam a constituir um regulamento interno, que deve ser de conhecimento de todos os funcionários, estagiários e bolsistas do laboratório.

Entre as características básicas de um SGQ, destacam-se (ABNT, 2001; ROSENBERG e SILVA, 1999):

- controle dos documentos, incluindo a aprovação, emissão e alterações;
- análise crítica dos pedidos, propostas e contratos;
- política e procedimentos de aquisição de serviços e suprimentos, bem como de subcontratação de serviços;
- procedimentos de atendimento ao cliente, às suas reclamações e outras não-conformidades;
- procedimentos de ações corretivas para não-conformidades e reclamações;

- a previsão de problemas que possam ocorrer, através das ações preventivas e auditorias internas, para tentar evitá-los;
- a validação de métodos selecionados e desenvolvidos;
- a repetitividade das atividades, especialmente as técnicas, como testes, calibrações, certificações, análises e ensaios;
- a confidencialidade, garantia de que os resultados de uma atividade sejam fornecidos apenas a quem a contratou ou solicitou;
- a confiabilidade de que na execução de um ensaio foi analisada a amostra correta, foi seguido um padrão conhecido, aplicado por um funcionário treinado para este fim e utilizados equipamentos adequados e em boas condições de funcionamento;
- registro escrito que evidencia a execução de todas as atividades, ocorrências, providências e resultados de análises;
- a rastreabilidade da medição, isto é, através do registro adequado das atividades possibilitar saber, a qualquer momento, quem se envolveu com cada etapa de sua execução, quais os equipamentos e materiais utilizados, quais as amostras ensaiadas e sua origem.

Para atender a essas e outras características do SGQ, após a elaboração dos manuais passa-se à redação dos procedimentos que são seguidos na realização de cada uma das atividades técnicas e administrativas do laboratório. A referência para elaboração dos procedimentos devem ser, sempre que disponíveis, as normas técnicas respectivas, como as da ABNT, Embrapa, ISO ou de outros organismos nacionais ou internacionais reconhecidos. Quando se tratar de atividade não normatizada, a elaboração do procedimento pode ser baseada em publicações consagradas e reconhecidas, ou em procedimento de outro laboratório certificado. É importante a participação dos funcionários na elaboração do procedimento e sua concordância com o texto final. Sempre que necessário, o procedimento é corrigido ou alterado. Fazem parte dos procedimentos a seqüência de operações para a realização de uma atividade, os cuidados e erros freqüentes, as características dos materiais, dos equipamentos e das amostras a utilizar, as planilhas e fichas para o registro adequado das atividades.

Com a finalidade de buscar a confiabilidade anteriormente citada, é necessário tomar cuidados especiais com o pessoal e os equipamentos. Cada atividade deve ser realizada por funcionário comprovadamente treinado, conforme registro assinado por quem o treinou. Os equipamentos precisam ser aferidos e calibrados, sendo que a periodicidade é função da precisão requerida para seu adequado funcionamento e da frequência de sua utilização. As calibrações, precisam ser realizadas por instituições credenciadas para tal serviço. A repetitividade em análises e ensaios depende, também, dos procedimentos, treinamento de pessoal e precisão dos equipamentos. Diferentes operadores devem obter resultados muito semelhantes para a mesma análise.

São realizadas auditorias periódicas por equipes externas e, com maior frequência, por equipes internas, isto é, constituídas por funcionários treinados do próprio laboratório. As auditorias internas tem por finalidade verificar o adequado funcionamento do SGQ, contemplando a cada vez alguns dos departamentos do laboratório. Além disso, servem como preparação para as auditorias externas, geralmente realizadas como parte dos processos de obtenção, manutenção e ampliação da certificação ou do credenciamento.

Os erros e dúvidas apuradas nas auditorias, bem como eventuais reclamações de clientes, são objeto de não-conformidades em relação ao SGQ, que ficam registradas por escrito. A cada registro de não-conformidade é indispensável que corresponda uma ação corretiva, que comprove as medidas saneadoras tomadas. Os erros em ensaios e procedimentos podem ser sistemáticos ou aleatórios, caracterização necessária para conduzir adequadamente as ações corretivas.

Porém, a mais importante condição para o adequado funcionamento do SGQ, é o envolvimento e comprometimento de todos os funcionários e dirigentes do laboratório com o sistema.

A implementação e a manutenção do SGQ representa um investimento financeiro significativo do laboratório. As despesas com uma eventual consultoria que auxilie na formulação e implantação do sistema, e com as auditorias do órgão ou empresa certificadora, não são as de maior vulto. A dedicação de todos os funcionários às

atividades do SGQ, ocupando parte de seu período de trabalho, exige equipes maiores para realização das tarefas. Além dos custos diretos das calibrações periódicas de equipamentos em instituições certificadas, surge a necessidade de duplicação de equipamentos, para que o serviço não sofra interrupção durante as calibrações. Deve-se considerar também as viagens para reuniões e cursos para os facilitadores, instalações prediais e ambientais como ar condicionado e umidificadores para atender aos requisitos de normas e procedimentos, entre outros. Porém, trata-se de investir na qualidade, produtividade e reconhecimento do laboratório, bem como na possibilidade de novas oportunidades que a certificação e o credenciamento podem ajudar a criar.

A implantação do sistema não é fácil. As dificuldades iniciais, nesse como em qualquer outro processo que implique em mudanças significativas de comportamento ou conduta, são grandes. As principais dificuldades estão relacionadas com a compreensão de sua finalidade (ROSENBERG e SILVA, 1999). As ações são confundidas com exigências burocráticas. É preciso contar com o apoio e compromisso de todos, mostrando que com um SGQ adequado, bem implementado e mantido, garante-se método e organização ao trabalho. Não se deve supor que o sistema torne as atividades imunes a erros e falhas. Porém, reduz consideravelmente a probabilidade de sua ocorrência.

## 4.2 SISTEMA DA QUALIDADE EM LABORATÓRIOS

Os documentos e procedimentos de sistemas de garantia da qualidade (SGQ), específicos para laboratórios de calibração ou de ensaios e análises tecnológicas, contém a mesma filosofia geral adotada em qualquer outro ramo de atividade, com as devidas adaptações. O primeiro documento é a NBR ISO/IEC 17025:2001 "Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração" (ABNT, 2001), norma brasileira que recentemente substituiu a norma da ABNT ISO/IEC Guia 25:1993. São documentos complementares a NBR ISO 9001:2000 "Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos", a ABNT ISO/IEC Guia 2 "Termos gerais e suas definições referentes à

normalização e atividades correlatas” e a VIM:Portaria INMETRO nº 29 de 10 de março de 1995 “Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia”.

Anteriormente os laboratórios eram certificados segundo os padrões NBR ISO 9001:1994 ou NBR ISO 9002:1994, sendo a segunda destinada a laboratórios que usam apenas métodos normatizados, enquanto a primeira envolve também o desenvolvimento de novos métodos. Com a mais recente revisão, a NBR ISO 9001:2000 passa a englobar as anteriores. Porém, ainda continuam existindo distinções entre certificações, cabendo à organização selecionar quais os critérios do padrão que envolvem os aspectos da gestão da qualidade que se enquadram à sua atividade. Deve justificar a eliminação de critérios do padrão que considera como inadequados para sua certificação.

No caso específico de laboratórios, a garantia da qualidade pouco guarda do aspecto mercadológico de competitividade de outras áreas de atividade, destacando-se a questão da confiabilidade. Ou o laboratório tem qualidade e é confiável, ou não tem confiabilidade, mesmo que o prazo de execução do serviço seja menor, ou o custo mais baixo (ROSENBERG e SILVA, 1999).

Com frequência as certificações segundo as normas da série ISO são criticadas, pois não representam uma garantia de que os serviços são realizados corretamente. Apenas atestam que o laboratório, como um todo, executa suas atividades técnicas e administrativas de acordo com uma política e um manual da qualidade adequados, e que dispõe e aplica procedimentos que garantem a repetitividade em suas ações.

Na realidade, se o laboratório atender o que preconizam as normas vigentes, isso não ocorre (GOMES, 2002). A NBR ISO/IEC 17025:2001 recomenda manter o controle estatístico dos resultados dos ensaios, e a NBR ISO 9001:2000 orienta para estabelecer um processo de monitoramento, medição, análise e melhoria. O controle estatístico dos ensaios e análises é uma forma de buscar a garantia da qualidade do processo. O controle da qualidade do produto final, que são os resultados dos ensaios, pode ser obtido através de programas interlaboratoriais, adiante descritos.

A busca de uma garantia da competência do laboratório para produzir dados e resultados tecnicamente válidos, é o papel dos organismos de credenciamento. Estes

precisam atuar segundo padrões reconhecidos internacionalmente, para poder manter acordos de reconhecimento mútuo com organismos equivalentes de outros países (ABNT, 2001). Sua atuação é mais voltada para os aspectos técnicos dos serviços prestados pelo laboratório.

O INMETRO é o organismo de credenciamento no Brasil. Atua através de programas interlaboratoriais e auditorias técnicas periódicas, além de ser responsável pela RBLE e pela RBC. As redes mantêm cursos de atualização e reuniões técnicas, através de suas Comissões Técnicas de Laboratórios de Ensaios (CTLE). É um exemplo a Comissão Técnica de Laboratórios de Ensaios em Construção Civil (CTLE 01), da qual faz parte o LAME/LACTEC.

O programa interlaboratorial de cada área, busca a qualidade dos resultados do ensaio realizado pelo laboratório, estabelecendo critérios técnicos para sua aceitação. A coordenação do programa prepara e envia, a cada laboratório inscrito, duas amostras para ensaio ou procedimento metrológico, estabelecendo a metodologia a ser adotada por todos. Cada amostra é, na realidade, uma parte da mesma amostra que foi enviada aos demais, para buscar a maior homogeneidade possível. Após analisar e interpretar os resultados remetidos pelos laboratórios, envia o relatório contendo médias, desvio padrão, comentários e sugestões de ações corretivas se necessário, aos diversos participantes representados apenas por códigos, que permitem a cada um identificar apenas a sua avaliação. É uma ferramenta para os laboratórios participantes, que podem comparar o nível de precisão dos resultados obtidos em ensaios ou processos metrológicos, com os demais laboratórios inscritos na mesma área tecnológica. Permite também avaliar a atuação de seus técnicos, o bom funcionamento de equipamentos e minimizar a possibilidade de erros em ensaios e procedimentos. Para o INMETRO, o programa interlaboratorial é uma forma de garantir a confiabilidade dos serviços prestados pelos laboratórios que compõem cada uma das redes (GOMES et al., 2001).

Nas auditorias do INMETRO, o laboratório precisa demonstrar aos auditores especializados na sua área de atuação, a sua competência na realização de cada ensaio para o qual pretende obter reconhecimento. Além disso, os aspectos institucionais e administrativos relacionados com a série NBR ISO 9000, também são

avaliados. O desempenho do laboratório no programa interlaboratorial correspondente é uma importante referência para a avaliação da equipe de auditores. Consequentemente, a participação do laboratório nos programas é também o primeiro passo para um pedido de credenciamento de ensaios junto ao INMETRO.

Em geral os processos repetitivos e sistemáticos como, por exemplo, os administrativos e de produção de grande parte das indústrias, são mais facilmente adaptados às exigências de sistemas de garantia da qualidade. Os serviços rotineiros dos laboratórios, como a execução de ensaios e análises que devem seguir normas e procedimentos padronizados, também não apresentam grande dificuldade para enquadramento nestes sistemas. Porém, a mesma facilidade não ocorre em trabalhos relacionados com pesquisa, desenvolvimento e inovação, que freqüentemente envolvem a criação, a modificação ou a adaptação de equipamentos e procedimentos. É difícil ou impossível padronizar todos os seus procedimentos. Essa dificuldade ocorre também em atividades com materiais de características e condições muito variadas, como é o caso dos estudos geotécnicos dos solos e outros materiais naturais, que podem exigir eventuais adaptações nos procedimentos de preparação de amostras, realização de ensaios e interpretação de resultados, para torná-los possíveis e representativos. A diversidade de atividades desenvolvidas em um laboratório de ensaios e pesquisas, que freqüentemente envolvem ainda atuação didática, representa outro obstáculo na busca de sua certificação e credenciamento.

Entretanto, os órgãos e instituições dedicados à certificação e ao credenciamento, bem como os procedimentos por eles preconizados e aplicados, adotam a flexibilização necessária para permitir contornar tais obstáculos. Trata-se de evidenciar claramente as exceções como, por exemplo, destacar a finalidade de pesquisa nas planilhas de ensaios que, por este motivo, não seguem padrões. Deve-se registrar na documentação as diferenças adotadas em procedimentos e suas causas, separar e identificar as amostras destinadas exclusivamente a atividades didáticas, identificar com etiquetas bem visíveis os equipamentos isentos de calibração periódica destinados exclusivamente a finalidades didáticas e treinamento. Os equipamentos passíveis de ter sua calibração ou aferição afetadas pelo uso por operador não



treinado, não podem ser utilizados em aulas e em outros serviços oficiais. Portanto, ocorre a necessidade de duplicação de diversos equipamentos. Algumas áreas do laboratório poderão ter seu acesso ou circulação de pessoas restritos ou controlados, para evitar problemas com equipamentos sensíveis, amostras e, principalmente, ensaios e análises em andamento. Durante sua permanência no laboratório, os alunos devem estar sempre acompanhados de professores, técnicos e estagiários, que conheçam o SGQ e estejam nele engajados. Além disso, os manuais do sistema de garantia da qualidade devem prever a possibilidade dessas situações e a sistemática a ser adotada em cada caso.

Tais exigências certamente representam cuidados, custos e dificuldades adicionais às atividades didáticas e de pesquisa no laboratório. Porém não são obstáculos intransponíveis. Os estudantes que tem apenas aulas práticas e treinamento no laboratório, devem receber algumas informações e orientações sobre o SGQ, ao iniciar suas atividades no laboratório. Os estagiários, bolsistas e pesquisadores externos, devem ser envolvidos e treinados, para atuar dentro do sistema, da mesma forma que os funcionários efetivos. São maneiras de garantir que a maior parte dos benefícios do SGQ seja estendida às atividades didáticas e de pesquisa.

#### 4.3 INSERÇÃO DA METODOLOGIA DE EROSÃO NO SISTEMA DA QUALIDADE

Na dissertação, a descrição de cada uma das técnicas implementadas no laboratório para a realização de ensaios de erosão busca, tanto quanto possível, seguir o modelo de procedimentos elaborados para atender as exigências de sistemas de garantia da qualidade, de modo a facilitar sua inserção em laboratórios credenciados.

Os ensaios e análises de erosão estão apresentados no capítulo 6, buscando atender aos principais requisitos da ISO/IEC 17025 (ABNT, 2001) já citada, bem como ao “Manual do Procedimento” do LAME (LAME, 2001). Com a mesma intenção e os mesmos cuidados, estão apresentadas em anexo ao final da dissertação, as planilhas que foram elaboradas e utilizadas na parte experimental da pesquisa.

Tomando como exemplo o que estabelece o “Manual do Procedimento do LAME” (LAME, 2001), os itens para compor os procedimentos da pesquisa devem ser os seguintes:

- **Objetivo e Aplicabilidade**

É descrito o objetivo, ou seja, a finalidade a que se destina o procedimento e definido onde ele se aplicará.

- **Normas e Documentos Complementares**

Citam-se as referências, métodos de ensaios e especificações que interferem ou complementam o procedimento.

- **Definições**

São descritas as definições utilizadas no procedimento, de forma a torná-lo mais facilmente compreensível.

- **Amostra**

Descreve-se o material a ser ensaiado e de que forma deve ser preparado. Quando há procedimento específico para preparação da amostra, está referenciado.

- **Equipamentos e Materiais Utilizados**

São relacionados todos os equipamentos e materiais necessários na execução do ensaio. No caso dos equipamentos citam-se suas características, como capacidade e precisão. Dos materiais são citados, quando é o caso, propriedades como pureza e concentração.

- **Instruções ou Procedimentos**

São apresentadas as instruções ou rotina, passo a passo, a serem seguidas na execução do ensaio.

- **Pontos de Verificação**

É parte de “Instruções ou Procedimentos”, e consiste na descrição de etapas anteriores e que possam influir nas etapas seguintes, como aferição de equipamentos ou condições ambientais de temperatura e umidade para realização do ensaio.

- **Causas Prováveis de Erros**

Também é parte de “Instruções ou Procedimentos”, na qual são relatadas as causas mais frequentes de erros no ensaio para tentar evitá-las.

- Responsabilidades

Indica a qualificação dos responsáveis pelas atividades inerentes ao procedimento em questão, no que se refere à realização da atividade, sua verificação e sua aprovação final.

- Anexos

São apresentados gráficos e planilhas, quando necessário.

Adaptações para cada laboratório são realizadas, em função de suas condições, organização e, eventualmente, características do sistema da qualidade adotado. Também os equipamentos a utilizar, materiais a ensaiar e objetivos específicos dos ensaios e análises a realizar, poderão ensejar modificações e adaptações. Porém, os procedimentos apresentados em anexo poderão facilitar tal tarefa.

## 5 MÉTODOS PARA ESTUDO DA EROÇÃO EM LABORATÓRIO

Através da pesquisa de métodos e procedimentos descritos na literatura, foram selecionados os mais adequados e possíveis de adaptar ao tipo e características do solo a ser analisado no estudo de caso, conforme descrito ao final do capítulo 3.

Além do tipo de solo a estudar, alguns critérios adicionais foram estabelecidos para a seleção. Os ensaios e análises deveriam, tanto quanto possível, permitir a elaboração de procedimentos, planilhas e registros, de modo a atender os requisitos básicos de um sistema de garantia da qualidade, citados no capítulo 4. Preferência foi dada a métodos cujo emprego na argila rija da Formação Guabirotuba ainda não tenha sido relatado.

### 5.1 MÉTODOS RELATADOS NA LITERATURA

Destacam-se a seguir alguns dos relatos que apresentam metodologias para estudos laboratoriais de erosão, que serviram para orientar a escolha dos métodos a utilizar na pesquisa.

São muitos e variados os métodos de laboratório descritos na literatura, para estudar a erodibilidade e o potencial erosivo dos solos. A detalhada revisão sobre estudos de erodibilidade realizada por Bastos (1999), permite concluir que uma das causas dessa diversidade é a quantidade de áreas de conhecimento envolvidas nos estudos de erosão. O autor analisa os métodos disponíveis, em função do enfoque de cada área de conhecimento: da Geologia de Engenharia, da Hidráulica de Canais, da Engenharia Geotécnica e da Agronomia, sendo esta última sub-dividida em Física dos Solos e Manejo e Conservação dos Solos. A interdisciplinaridade, unindo conceitos e métodos das diferentes áreas de conhecimento como Engenharia Geotécnica e Geotecnia Ambiental, Engenharia Hidráulica e Hidrologia, Agronomia e Engenharia Agrícola, Geologia e Geografia, é uma característica dos estudos, programas e eventos técnico-científicos de maior importância e melhores resultados, relacionados à erosão.

Além da diversidade de enfoque, os métodos são desenvolvidos visando aplicações específicas a determinados tipos, características ou condições de solos. Por exemplo, existem métodos elaborados para aplicação a solos coesivos, colapsíveis, dispersivos, não saturados, argilosos, e outros. Existem também testes que visam reproduzir determinadas formas de ação erosiva, como escoamento superficial, fluxo subterrâneo, impacto de gotas de chuva, desagregação (*"slaking"*) e outros.

Outra classificação subdivide os métodos de laboratório em diretos e indiretos. Os primeiros permitem avaliar diretamente a erodibilidade, como o ensaio Inderbitzen ou o de resistência dos agregados ao impacto da gota. Os indiretos buscam a correlação entre a erodibilidade e outra característica dos solos, como a coesão, a granulometria ou os limites de Atterberg, entre outros.

Head (1994), descreve cinco métodos de ensaio de erodibilidade de solos: do furo de agulha (*"pinhole test"*), do torrão (*"crumb test"*), sedimentométrico comparativo, análises químicas da água intersticial e de dispersão do cilindro, sendo esse último uma extensão do ensaio do torrão. Os quatro primeiros são padronizados no Brasil através de normas da ABNT. O foco desses métodos é avaliar a dispersibilidade dos solos.

Bastos (1999), apresenta uma sub-divisão dos métodos de análises e ensaios conhecidos, resumidamente apresentada a seguir:

a) ensaios de caracterização:

- caracterização geotécnica, através de análise granulométrica, limites de Atterberg e densidade dos grãos;
- caracterização química, através de capacidade de troca catiônica, sais dissolvidos e fluorescência de Raios X;
- caracterização mineralógica e microestrutural, através de difratometria de Raios X e microscopia eletrônica;
- relação entre sucção e umidade através da técnica do papel filtro;
- caracterização pela metodologia Miniatura, Compactado, Tropical (MCT), através da compactação dinâmica Mini-MCV (modificação brasileira do *Moisture condition value*) e perda de massa por imersão.

b) ensaios geomecânicos:

- resistência ao cisalhamento através de cisalhamento direto convencional e com sucção controlada;
- colapsibilidade em oedômetros.

c) ensaios para avaliação da erodibilidade:

c.1) diretos:

- ensaio de Inderbitzen.

c.2) indiretos:

- metodologia MCT, através de infiltrabilidade (ou sorção) e erodibilidade específica (ou perda de massa por imersão);
- metodologia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), de Portugal, através de expansibilidade LNEC e limite de absorção;
- sedimentométrico comparativo, também conhecido como dispersão SCS, do *Soil Conservation Service* (SCS/USDA);
- desagregação ("*slaking test*");
- cone de laboratório;
- estabilidade de agregados.

O autor destaca dois ensaios específicos para estudar a erodibilidade, o ensaio de Inderbitzen e o ensaio de desagregação (BASTOS, 1999; BASTOS et al., 2000). Detalha também em seus trabalhos os ensaios para pesquisar a erodibilidade através da metodologia MCT, bem como correlações com outras características geotécnicas, como coesão e colapsibilidade. Verifica uma satisfatória correspondência entre o comportamento em campo e os resultados em laboratório de ensaios Inderbitzen nos solos residuais enfocados em sua pesquisa. O ensaio de desagregação evoluiu do ensaio de torrão, sendo o último dirigido para a identificação de solos dispersivos através da imersão de agregados de solo em água. Entretanto o objetivo maior do ensaio de desagregação é a verificação da estabilidade à desagregação, independente da dispersividade do solo. Bastos (1999) indica o ensaio de desagregação como critério preliminar na avaliação da erodibilidade, pela sua simplicidade e adequados resultados obtidos para solos residuais. Aponta também bons resultados obtidos em solos

residuais não saturados, ao aplicar a metodologia MCT através dos ensaios de infiltrabilidade e de erodibilidade específica.

Em Fonseca e Ferreira (1981) e Brasil (1979), está relatado um estudo de solos provenientes de taludes da Rodovia Rio-São Paulo, incluindo ensaios de caracterização geotécnica e de erosão. Os ensaios de erosão são de desagregação e Inderbitzen, que apresentam, segundo as autoras, boa representatividade das observações de erosão em campo. Apontam também outros ensaios geotécnicos que apresentam bons resultados para avaliação da suscetibilidade dos solos à erosão: análise granulométrica, limites de consistência de Atterberg, expansibilidade LNEC e limite de absorção.

O ensaio Inderbitzen é também o mais indicado como conclusão do trabalho de Fácio (1991), que estuda solos predominantemente granulares e não saturados, de Brasília. Apresenta detalhadas instruções e recomendações para realização do ensaio, e propõe modificações no equipamento originalmente idealizado por Inderbitzen (1961). Sugere a inclusão de um simulador de chuva ao equipamento, para combinar os efeitos de impacto das gotas com o escoamento superficial. Conclui recomendando novas pesquisas visando a padronização e a normatização do ensaio.

O mesmo procedimento é adotado por Lemos (2002), que combina o efeito simultâneo do escoamento superficial do ensaio Inderbitzen, com um simulador de chuva instalado sobre a rampa do mesmo aparelho. Busca comparar a erodibilidade de um solo de uso agrícola submetido a duas formas de plantio, direto e convencional.

Santos (1997), além dos ensaios usuais para caracterização geotécnica dos solos de Goiânia provenientes de locais com ocorrência de erosões, utiliza para estudá-los os ensaios de Inderbitzen, de desagregação e do furo de agulha. Conclui que é difícil estabelecer uma relação direta entre as propriedades físicas, estudadas através dos ensaios de caracterização, e a suscetibilidade à erosão. Segundo o autor os ensaios de erosão são satisfatórios, permitindo comparações válidas entre os resultados dos diferentes métodos, bem como adequada representatividade em laboratório das observações de campo. Em relação ao ensaio do furo de agulha, destaca que a sua inclusão no estudo busca informações sobre erosão interna e profunda. Na análise de

estabilidade dos taludes das voçorocas de Goiânia, objeto do estudo, o autor observa a importância de realizar ensaios de sucção, praticamente iguais às curvas de retenção utilizadas em estudos agrônômicos, devido a influência desse aspecto na resistência dos solos.

Na realidade, a sucção está relacionada com diversas propriedades e características do comportamento dos solos não saturados. Marinho (1994) afirma que a caracterização do solo através da sucção é a melhor maneira de se entender o equilíbrio de umidade dos solos. Propõe o método do papel filtro para determinar em laboratório a sucção matricial e total, bem como a curva característica do solo, que representa a relação entre sucção e umidade.

Campos et al. (1992) comparam a retenção, usual na área de agronomia, e a sucção que, embora de aplicação recente, já é uma rotina na geotecnia. A diferença está na consideração da umidade, que pode ser expressa como uma relação entre volumes ou entre pesos. Para a retenção a umidade é determinada através da relação entre os volumes de água e da amostra. Para a determinação da sucção, utiliza-se a relação entre o peso da água e do solo seco. Afirmam os autores que o inconveniente da umidade volumétrica é a necessidade de determinar a variação do volume total da amostra, que ocorre com a correspondente alteração da sucção. Consideram que nos problemas relacionados à ruptura como, por exemplo, a estabilidade de uma encosta ou o estudo da erosão, é mais conveniente a utilização da umidade gravimétrica, isto é, em peso do solo. Para problemas envolvendo análises de deformações de solos não saturados, o emprego da umidade volumétrica é mais conveniente. Definem ainda os autores, que a sucção mátrica ou matricial é a parcela da sucção total que interfere significativamente no comportamento geral dos solos não saturados, e na sua resistência ao cisalhamento em particular.

Buscando relacionar a erodibilidade a outras propriedades de solos brasileiros, Angulo (1983) realiza análises físicas de distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água, com imersão direta e à vácuo, resistência dos agregados ao impacto da gota e diversas análises químicas. Não são métodos rotineiros. Permitem analisar



esses aspectos pouco considerados e que, no entanto, têm influência na erosão dos solos.

Bender (85), estuda dois tipos de solos tropicais da Costa do Marfim, solos finos lateríticos e saprólitos de alteração de rocha. Indica que, em alguns casos, a quantidade de precipitações e o grau de saturação do solo antes da chuva são mais importantes, em relação à erosão, do que a duração da chuva. Observa que não é possível a diferenciação entre solos erodíveis e não erodíveis, apenas com base na granulometria, limites de Atterberg e densidade. O estado e a estrutura do solo podem influenciar significativamente a erosão. Considera a coesão como propriedade mais adequada para a caracterização. Porém, observa que na superfície dos solos finos pouco coerentes, a coesão não é constante. Ela depende do estado de tensões e da umidade no início da erosão. O autor realiza diferentes ensaios de resistência ao cisalhamento, além de ensaios de caracterização, e de erosão no campo.

No relatório do Comitê de Solos Tropicais da ISSMFE (1985), os critérios relacionados para previsão de instabilidade superficial em taludes de corte devido a erosão em solos tropicais, são: a USLE (ver capítulo 2), testes de erosão e outros, índices geotécnicos de classificação de solos, critérios genéticos com base na geologia e na pedologia. Entre os testes de erosão, destaca o relatório os de Inderbitzen, de Philliponnat, de Nogami e Villibor (MCT) e o ensaio *in situ* proposto por Bender.

Araújo (2000), para estudar a erodibilidade de solos da Formação Barreiras, realiza análises e ensaios diretos e indiretos. São ensaios de caracterização física, como granulometria com e sem defloculante, limites de Atterberg e MCT, para tentar estabelecer correlações com a erodibilidade. O autor utiliza análises mineralógicas por difração de Raio x para identificar os argilo-minerais predominantes, o uso de lupa binocular para a caracterização mineralógica da fração areia e análises químicas do solo e da água intersticial. Inclui a obtenção de curvas características de sucção pelo método do papel filtro, determinação da resistência à tração do solo através da compressão diametral, desagregação e penetração de cone.

A metodologia MCT tem sido utilizada como uma classificação geotécnica para solos tropicais (COZZOLINO e NOGAMI, 1993). Dadas as peculiaridades desses solos,

as classificações geotécnicas usuais levam a resultados não condizentes com o desempenho real, nas obras de engenharia, dos seus diversos grupos. Os motivos desse problema estão relacionados com as peculiaridades mineralógicas e estruturais dos solos tropicais. São considerados como classes importantes de solos tropicais nos estudos geotécnicos, os solos lateríticos e os saprolíticos, nas quais não se enquadram as argilas da Formação Guabirotuba.

Apesar disso, já existem estudos com a utilização da metodologia MCT às argilas em questão, e com bons resultados. Estudando em laboratório os solos da Formação Guabirotuba, para estabelecer relações entre o seu comportamento geotécnico e a interação com soluções contaminantes, Siedlecki e Fiori (1999) recomendam a utilização da metodologia MCT. Segundo os autores, bons resultados são obtidos através dos ensaios de absorção de água e de perda de peso por imersão, em estudo de erodibilidade. Os mesmos resultados são utilizados por Felipe (1999), estudando também os solos da Formação Guabirotuba com vistas à erosão.

Um novo modelo de ensaio denominado Inderbitzen Modificado, ou ainda Grau de Erodibilidade do Solo (GES), é proposto em estudo envolvendo amostras de solo residual e laterítico das cidades de Alfenas e Poços de Caldas (FREIRE, 2001; FREIRE e GALVÃO, 2002). O novo método é, segundo seu autor, uma tentativa de representar em laboratório as duas etapas do processo erosivo que ocorre na superfície do solo durante as precipitações, a desagregação das partículas através do impacto das gotas, seguido de carreamento pelo escoamento superficial. Apesar desses dois únicos relatos sobre o novo método não contemplarem detalhes executivos, e de se tratar, segundo depoimento pessoal do autor, de metodologia ainda em desenvolvimento, é uma proposta interessante e promissora. Pode vir a complementar o ensaio Inderbitzen com um certo efeito desagregador das gotas. Além disso, pode vir a tornar o escoamento superficial do ensaio mais próximo do natural, em comparação com o que ocorre no ensaio Inderbitzen, por se dar sobre o solo do corpo de prova.

## 5.2 SELEÇÃO DE MÉTODOS PARA A PESQUISA

Na seleção de ensaios para compor a metodologia a empregar na pesquisa, consideraram-se os resultados pretendidos, o tipo de solo a ser analisado, bem como as limitações de recursos e de prazos. A opção por equipamentos mais simples e de menor custo visou também testar a possibilidade de desenvolvimento de equipamentos no próprio laboratório, ou seja, que possam ser desenvolvidos em qualquer laboratório.

Foi definida uma metodologia constituída por correlações e ensaios de erosão. As correlações são com os limites de Atterberg e a análise granulométrica, e com a relação umidade e sucção, todos disponíveis e realizados rotineiramente no laboratório do LAME/LACTEC. Os ensaios de erosão, ainda não disponíveis no laboratório, são furo de agulha (ou *"pinhole test"*), torrão (ou *"crumb test"*), desagregação (ou *"slaking test"*), sedimentométrico comparativo (ou dispersão SCS), Inderbitzen, análise química da água intersticial e Inderbitzen Modificado (ou GES). Com exceção da análise química da água intersticial, não foram localizados relatos de aplicação desses ensaios de erosão aos solos argilosos da Formação Guabirotuba. A perspectiva de realizar a análise química da água por diversos métodos disponíveis no laboratório, para comparar os resultados, levou à inclusão desse ensaio.

Foram selecionados ensaios para estudar a dispersividade de argilas, que são furo de agulha, análise química da água intersticial, sedimentométrico comparativo e de torrão, como uma tentativa de verificar essa condição na argila em estudo. Tal possibilidade foi levantada pelo teor de sódio observado nesse solo em outras pesquisas (MASSAD et al., 1981; BOSZCZOWSKI, 2001).

Foram escolhidos ensaios com possibilidade de envolver a influência das descontinuidades, da expansão e retração e do empastilhamento característicos da Formação Guabirotuba, bem como de simular processos naturais e condições específicas de maior suscetibilidade à erosão. São os ensaios de desagregação, Inderbitzen e Inderbitzen Modificado, em amostras indeformadas. Parte do equipamento para a realização do ensaio Inderbitzen foi cedido pelos laboratórios do

Setor de Ciências Agrárias da UFPR, desenvolvido para outra pesquisa (LEMOS, 2002).

## 6 METODOLOGIA E MATERIAIS

Conforme descrito no capítulo anterior, a metodologia selecionada é constituída pelas seguintes análises e ensaios: limites de liquidez e plasticidade, massa específica dos sólidos, granulometria, umidade natural, sucção, furo de agulha, sedimentométrico comparativo, torrão, desagregação, análise química da água intersticial, Inderbitzen e Inderbitzen modificado. Além disso, para a preparação de amostras remoldadas utilizou-se o ensaio de compactação de solos com energia normal.

Os ensaios de limites de liquidez e plasticidade, granulometria, massa específica real dos sólidos, umidade natural, sucção e compactação, são rotineiramente realizados no laboratório do LAME/LACTEC. São ensaios bastante conhecidos e difundidos, e dispõem de procedimentos baseados em normas da ABNT. Julgou-se desnecessário descrever os materiais e métodos empregados, tendo sido apenas citadas as normas brasileiras nas quais baseiam-se os procedimentos adotados.

Os demais ensaios foram implementados no laboratório, para constituir a metodologia da pesquisa. São os ensaios de erosão de solos: furo de agulha, sedimentométrico comparativo, torrão, análise da água intersticial, desagregação, Inderbitzen e Inderbitzen modificado. Os quatro primeiros são padronizados pela ABNT, e os procedimentos adotados na pesquisa baseiam-se nas respectivas normas. Complementações e adaptações às prescrições das normas são apresentadas, visando ampliar as possibilidades de sua aplicação e adaptá-las aos solos estudados. Para os outros três ensaios, não normatizados, a base dos procedimentos adotados são descrições encontradas na literatura. Os sete ensaios estão detalhadamente descritos neste capítulo, incluindo os materiais e os equipamentos, as amostras, os procedimentos de norma ou de outros relatos, os procedimentos adotados, observações realizadas durante sua execução, comportamento dos solos ensaiados e adaptações necessárias nos procedimentos normatizados. Para ilustrar e complementar as descrições, um registro fotográfico dos testes é apresentado.

A sequência adotada na apresentação dos métodos segue as recomendações de sistemas de garantia da qualidade, e contém os itens necessários para compor um procedimento, conforme descrito no capítulo 4. As descrições não constituem textos apropriados para procedimentos técnicos de sistemas da qualidade, pois incluem comentários e observações específicas da pesquisa. Porém, podem servir como orientação, pois delas podem ser extraídos os procedimentos de ensaios. Descrições detalhadas e observações específicas da pesquisa são apresentadas, visando auxiliar outros pesquisadores a implementar a metodologia.

## 6.1 AMOSTRAS

### 6.1.1 Seleção, Origem e Coleta

Considerando os objetivos da pesquisa, optou-se pela utilização de amostras de dois solos distintos, a argila rija da Formação Guabirotuba e um solo granular qualquer. Essa argila rija, por suas características peculiares, geralmente apresenta dificuldades em todas as etapas: coleta e preparação de amostras, realização de ensaios e análise dos seus resultados. Por isso, não é o material adequado para a implementação de uma metodologia. Buscou-se, com a utilização do solo granular, facilitar a implementação dos ensaios, para a posterior aplicação e adaptação à argila de interesse. Além disso, a aplicação da metodologia tanto a solos argilosos, como a solos arenosos, permite melhor avaliação dos métodos e de seu alcance. Assim, na fase de implementação da metodologia, treinamento e elaboração de procedimentos, decidiu-se utilizar uma amostra de solo arenoso disponível no laboratório, selecionada principalmente em função da facilidade de manuseio e de execução das análises e ensaios.

Como alguns dos métodos selecionados destinam-se a solos argilosos, buscou-se um solo granular predominantemente arenoso, porém com fração fina significativa. Utilizou-se uma amostra disponível no laboratório, restante de um material

anteriormente utilizado em atividades didáticas. O local de origem da amostra é desconhecido, aspecto sem importância dados os objetivos de sua utilização.

Após a conclusão da etapa de implementação de cada método com o solo arenoso, os mesmos foram aplicados a amostras do solo argiloso da Formação Guabirota. As amostras da argila foram coletadas em área destinada a pesquisas, conhecida como Sítio Experimental de Geotecnia do Centro Politécnico da UFPR, em Curitiba. Tal área faz parte de extensa pesquisa que vem se desenvolvendo nos últimos anos, visando estudar as características e o comportamento dos solos argilosos da Formação Guabirota, sob o enfoque da geotecnia (e.g. CHAMECKI et al., 1998; BOSZCZOWSKI, 2001; KORMANN, 2002). A utilização de amostras dessa área de pesquisa apresenta a vantagem de permitir comparações dos ensaios e análises para estudos de erosão, com diversos outros estudos anteriormente realizados. A presente pesquisa representa, assim, mais uma etapa do Sítio Experimental. Processos erosivos podem ser observados na região (Figura 2), em taludes de argila rija da Formação Guabirota.

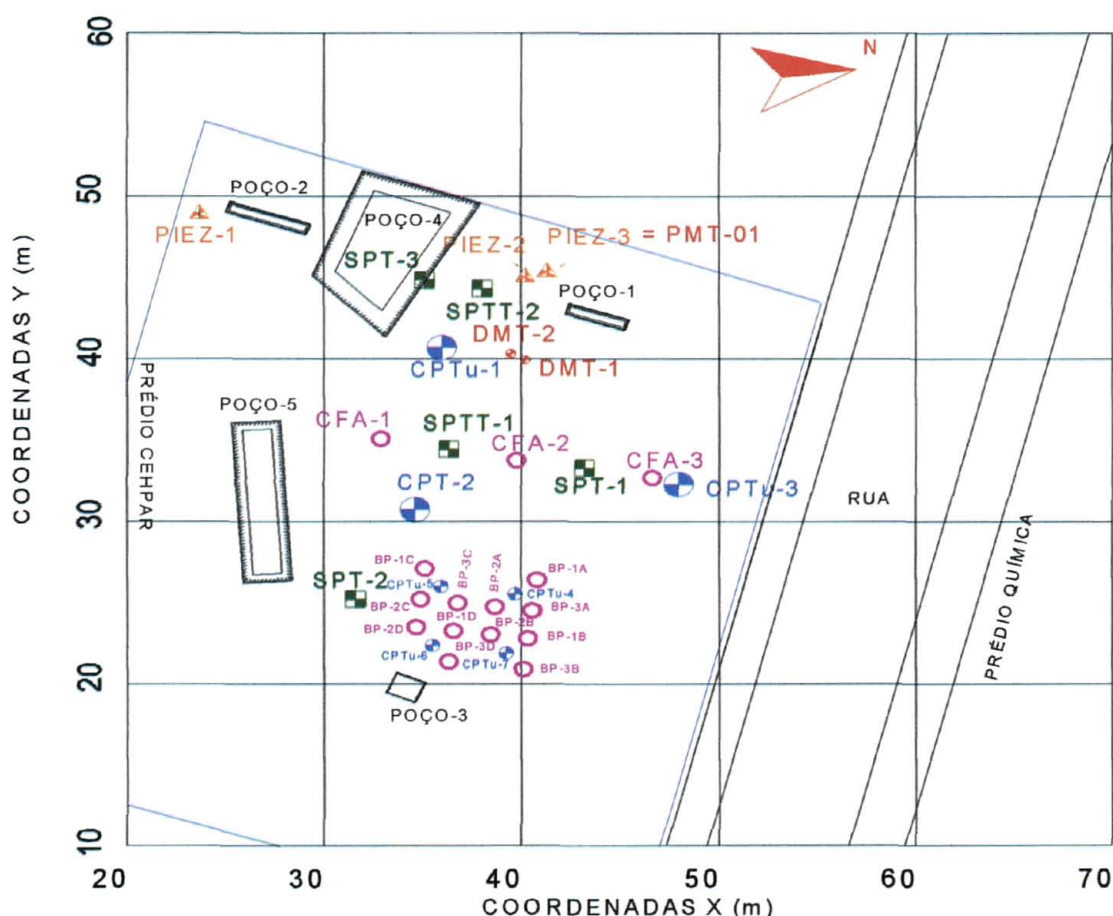
FIGURA 2 – EROSÃO NA ARGILA RIJA, EM TALUDE NO CENTRO POLITÉCNICO DA UFPR





Foram coletadas amostras dessa argila rija na Área 1 do Sítio Experimental de Geotecnia. Nessa área, desde as porções mais superficiais do terreno predomina a argila rija de cor cinza e marrom com veios pretos, característica da Formação Guabirotuba. Em vala de grandes dimensões, identificada como Poço 5 (Figura 3), aberta para a retirada de amostras de diversas pesquisas, foram coletados os solos para os ensaios de erosão. Os pontos de coleta situam-se a profundidades entre 2,5 e 3,0m abaixo do nível do terreno.

FIGURA 3 – SÍTIO EXPERIMENTAL DE GEOTECNIA DA UFPR, PLANTA DA ÁREA 1



Na Figura 3 estão indicados outros estudos realizados para diversas pesquisas na Área 1, através das siglas: SPT = sondagem de simples reconhecimento com ensaios “Standard Penetration Test”; SPTT = sondagem de simples reconhecimento



com ensaios SPT e de torque; DMT = dilatômetro; CPT = “*cone penetration test*”; CPTu = CPT com medida de pressão neutra; PMT = pressiômetro; PIEZ = piezômetro; CFA = estaca hélice contínua e BP = estaca escavada.

Para os ensaios Inderbitzen na argila, foram coletadas amostras diretamente nos anéis metálicos a serem utilizados nos ensaios (Figura 4), cravando-os lentamente no terreno, com os cuidados necessários para provocar o mínimo de distúrbio na estrutura do solo. Foram coletadas 15 amostras em anéis, sendo 8 em parede de pouca insolação na vala, e 7 em parede que recebe diretamente os raios solares, apresentando solos superficiais naturalmente mais ressecados. Para os demais ensaios da argila foi utilizada amostra indeformada, em bloco de 25 cm de lado, coletado na mesma vala e aproximadamente na mesma profundidade dos anéis.

FIGURA 4 – COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DA ARGILA EM ANÉIS METÁLICOS



### 6.1.2 Preparação das Amostras

A amostra remoldada de solo arenoso, foi previamente seca ao ar no laboratório. Foi destorroada com auxílio do almofariz e mão de gral. Tal procedimento, rotineiro em laboratórios de solos, contraria alguns dos procedimentos e normas de ensaios como, por exemplo, da análise química da água intersticial, que recomenda a utilização de amostras na umidade natural. Porém, considerando os objetivos anteriormente descritos, que levaram à utilização do solo arenoso, julgou-se que esse aspecto não tinha maior importância.

No caso do solo argiloso, tanto os anéis, como o bloco, foram protegidos ainda no campo para manutenção das condições naturais de umidade, desde a coleta até a sua entrada na câmara úmida do laboratório. Os anéis foram envoltos em filme transparente de PVC e o bloco protegido com várias camadas alternadas de parafina e bandagem. A preparação dos corpos de prova para os ensaios foi feita dentro da câmara úmida, na qual mantém-se permanentemente controladas a temperatura em torno de 23°C e a umidade próxima de 95%. Tais cuidados, importantes em qualquer estudo de solos que busca reproduzir condições naturais em laboratório, têm se mostrado imprescindíveis no caso da argila rija da Formação Guabirotuba. A variação de umidade provoca intensa fissuração e empastilhamento, modificando as condições naturais das amostras.

## 6.2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS DE EROSÃO

Estão descritos a seguir, os sete ensaios selecionados para constituir a metodologia experimental de erosão, da forma como foram realizados no estudo de caso. As descrições são complementadas pelas planilhas elaboradas para cada ensaio, apresentadas em anexo. Tais planilhas também buscam atender aos requisitos básicos de sistemas da qualidade.

Para os ensaios rotineiros e padronizados no Brasil estão citadas, a seguir, as normas da ABNT que definem seu procedimento e materiais a empregar:

- NBR 6457/1986 Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 6459/1984 Solo – Determinação do limite de liquidez;
- NBR 7180/1984 Solo – Determinação do limite de plasticidade;
- NBR 7181/1984 Solo – Análise Granulométrica;
- NBR 7182/1986 Solo – Ensaio de compactação;
- NBR 6508/1984 Solo - Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica.

Para os demais ensaios rotineiros, foram adotados os seguintes procedimentos:

- DNER-ME 093/94 Solos – Determinação da densidade real;
- Medição de sucção pelo método do papel filtro (MARINHO, 1994).

#### 6.2.1 Ensaio do Torrão ("*Crumb Test*")

- Objetivo e Aplicabilidade

O objetivo desse procedimento é a avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão, também conhecido como "*crumb test*", ou como ensaio de dispersão rápida (BORDEAUX e NAKAO, 1974; HSU, 1974; SILVA e LACERDA, 2001). A avaliação é visual, pois é feita através de observações do comportamento de torrões do material, quando imersos em água destilada e, eventualmente, também em solução de hidróxido de sódio.

O ensaio proposto por Sherard et al. (1976a) indica, segundo seus autores, que o solo provavelmente é dispersivo quando ocorre dispersão do torrão durante o ensaio. Porém, alertam que o inverso não é necessariamente verdadeiro, pois pode não ocorrer dispersão no ensaio e tratar-se de solo dispersivo. Isso faz do ensaio uma avaliação qualitativa recomendada apenas em investigações preliminares, exigindo complementação com outros métodos para avaliações mais conclusivas.

No entanto, sua rapidez e simplicidade tornam sua utilização conveniente, principalmente para verificar a necessidade de utilizar métodos mais demorados e que podem envolver procedimentos mais complexos e equipamentos de maior custo. Em estudo rotineiro, se o ensaio de torrão indicar que o solo é dispersivo, poderiam ser dispensados outros métodos.

Outra característica positiva do método é permitir simular condições de interesse do estudo e comparações, tanto no que se refere à condição prévia do solo, como no que diz respeito aos diferentes líquidos que poderão provocar a dispersão. É possível analisar o comportamento do solo indeformado, compactado, na umidade natural, previamente ressecado, saturado, ou em outras condições. Também podem ser realizadas comparações do seu comportamento quando imerso em água destilada, em efluentes provenientes do local em estudo ou em diferentes soluções preparadas em laboratório.

- Normas e Documentos Complementares

*Normas:*

- ABNT - NBR 13601/1996 Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*crumb test*) – Método de ensaio;
- ABNT – NBR 7182/1986 Solo – Ensaio de compactação – Método de ensaio.

Observa-se (HEAD, 1994) que este ensaio é também objeto de norma inglesa, BS 1377: Part 5.

*Documentos complementares:*

- (HEAD, 1994);
- (SHERARD et al. ,1976a).

- Definições

Dispersão ou defloculação das argilas em presença de água, é o fenômeno que ocorre quando as forças de repulsão entre as partículas individuais de argila sobrepujam as forças de atração, de modo que, em contato com água, estas partículas são progressivamente destacadas da massa de argila e formam uma suspensão. Caso haja fluxo de água, as partículas dispersadas são carregadas, ensejando a ocorrência do fenômeno conhecido como erosão interna (*"piping"*) por dispersão (ABNT, 1996a).

Mitchell (1993) observa que certos solos de granulometria fina são estruturalmente instáveis, facilmente dispersados e que, portanto, são altamente erodíveis. Define as argilas dispersivas como os solos nos quais as partículas destacam-se espontaneamente umas das outras e da estrutura do solo, ficando em suspensão mesmo em águas calmas.

- Amostra

É conveniente que a amostra de solo seja indeformada e que seja preservada sua umidade natural. Na falta de amostras indeformadas, ou se for considerado mais interessante estudar o solo em condição diferente da natural, por exemplo para sua utilização em aterro compactado, podem ser utilizadas amostras deformadas compactadas. Nesse caso, a sua compactação deve ser realizada de forma semelhante ao procedimento descrito na NBR 7182, buscando uma aproximação das condições que poderão ocorrer no campo.

A argila foi estudada com a amostra indeformada mantida em câmara úmida, como descrito anteriormente. O solo arenoso já tinha sido previamente seco ao ar e destorroado, impossibilitando a manutenção de sua umidade natural. Foi ensaiado como amostra compactada.

- Equipamentos e Materiais Utilizados (Figura 5.a):

- a) no mínimo três béqueres de vidro, com capacidade de 200 ml, sendo um para cada torrão a ser ensaiado;
- b) água destilada;
- c) hidróxido de sódio anidro, caso haja interesse em realizar o ensaio também em hidróxido de sódio;
- d) materiais e equipamentos para compactação de solos, conforme previsto na NBR 7182, caso sejam utilizadas amostras compactadas;
- e) demais materiais usuais de laboratório, como paquímetro, cronômetro e película transparente de PVC.



FIGURA 5 – ENSAIO DO TORRÃO, EQUIPAMENTO E PREPARAÇÃO



a) Equipamento básico



b) Preparação do torrão

- Instruções ou Procedimentos

*Preparação da amostra:*

Os corpos de prova são torrões de formato aproximadamente esférico, com diâmetro compreendido entre 6 mm e 10 mm (Figura 5.b). Devem ser, no mínimo, três torrões para cada solo e condição a ser estudada.

Para estudar a argila, foram talhados torrões de amostras indeformadas em três condições de umidade:

- talhados e ensaiados na umidade natural;
- talhados na umidade natural, mas ensaiados após quinze dias de exposição ao ar para provocar seu ressecamento;
- talhados a partir de um bloco indeformado, depois que este ficou ressecado pela exposição ao ar por aproximadamente 15 dias.

Para estudar o solo arenoso foi inicialmente realizado um ensaio de compactação com energia normal, conforme a NBR 7182, determinando-se sua umidade ótima de compactação e a massa específica aparente seca máxima. Nessas condições foi compactada a amostra, moldando-se um corpo de prova na umidade ótima. Do corpo de prova cilíndrico assim obtido, foram talhados os torrões esféricos para os ensaios. A

cada etapa, os materiais foram protegidos com filme de PVC e mantidos em câmara úmida para preservar a umidade de moldagem.

Deve ser verificado com o paquímetro em diversas posições, se os torrões talhados atendem a condição de diâmetro entre 6 mm a 10 mm. Nas análises realizadas observaram-se diferenças de reações entre torrões de um mesmo ensaio. Tal fato justifica a recomendação de utilização de três ou mais torrões para cada ensaio, bem como de procurar eliminar diferenças significativas de dimensões dos torrões.

Com sobras dos materiais utilizados na talhagem dos torrões, determinou-se a umidade de cada material ao ser ensaiado. No caso dos torrões expostos ao ar para provocar seu ressecamento, foram deixadas lascas resultantes da moldagem nas mesmas condições, para a determinação da umidade dos torrões no momento do ensaio.

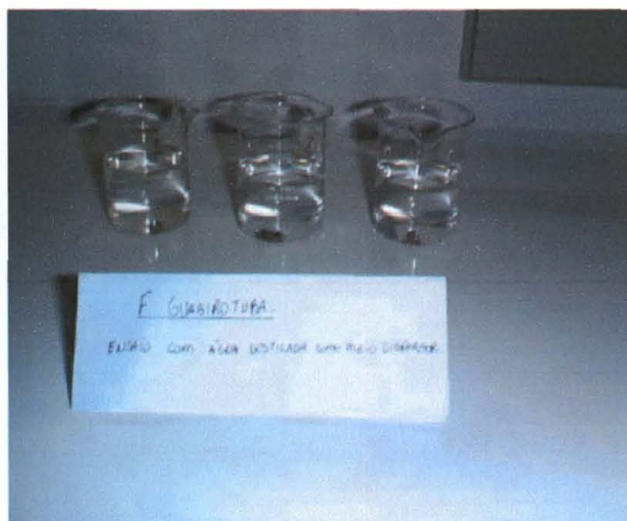
#### *Ensaio:*

Cada torrão é colocado em um béquer contendo cerca de 150 ml de água destilada, e aciona-se o cronômetro (Figura 6.a). Ao longo de uma hora observam-se e registram-se as reações ocorridas e o tempo decorrido (Figura 6.b).

FIGURA 6 – ENSAIO DO TORRÃO, INÍCIO E ANDAMENTO



a) Colocação do torrão no béquer



b) Ensaio em andamento

Cuidados devem ser tomados na colocação dos torrões no béquer, pois essa operação pode, aparentemente, influir no resultado do ensaio. O impacto no fundo pode facilitar o seu esboroamento, especialmente em solos fraturados. A agitação do líquido pode facilitar o espalhamento da película de turvação nos solos dispersivos.

Apesar de ser comum (SHERARD et al., 1976a; HEAD, 1994) a recomendação de ensaios com duração de cinco a dez minutos, as análises realizadas indicaram a conveniência, ao menos em alguns casos, de observações mais longas. Algumas reações ocorrem ou tornam-se mais evidentes ao longo de maiores intervalos de tempo. Outras podem ser dissimuladas em tempos longos, pela homogeneização de reações rápidas e heterogêneas. Adotou-se ensaio com duração de uma hora, porém com atenção especial nos dez minutos iniciais do ensaio, período mais provável de ocorrência de reações significativas.

O procedimento incluiu uma complementação possível, através da imersão de torrões em solução de hidróxido de sódio, em lugar de água destilada. A NBR 13601 recomenda a utilização de uma solução com concentração de 1meq/L (0,001 normal), obtida pela dissolução de 0,04 g de hidróxido de sódio anidro em 1000 ml de água destilada. Sherard et al. (1976a) concluem que esta condição de ensaio pode ser excessivamente severa, podendo ocorrer dispersão embora o solo seja não dispersivo. Consideram que o ensaio em água reproduz melhor a erosão observada em campo, conclusão semelhante a de Silveira et al. (1974).

Os ensaios foram realizados com imersão dos torrões em água e também em solução de hidróxido de sódio. Os resultados apresentados no capítulo 7 confirmam que a análise em solução de hidróxido de sódio é realmente mais severa. Mas indicam também que sua realização pode ser conveniente em alguns casos, por ressaltar aspectos difíceis de observar nos ensaios em água destilada. Em outros casos, não ocorrem diferenças significativas entre as análises em água e em solução de hidróxido de sódio.

#### *Cálculos:*

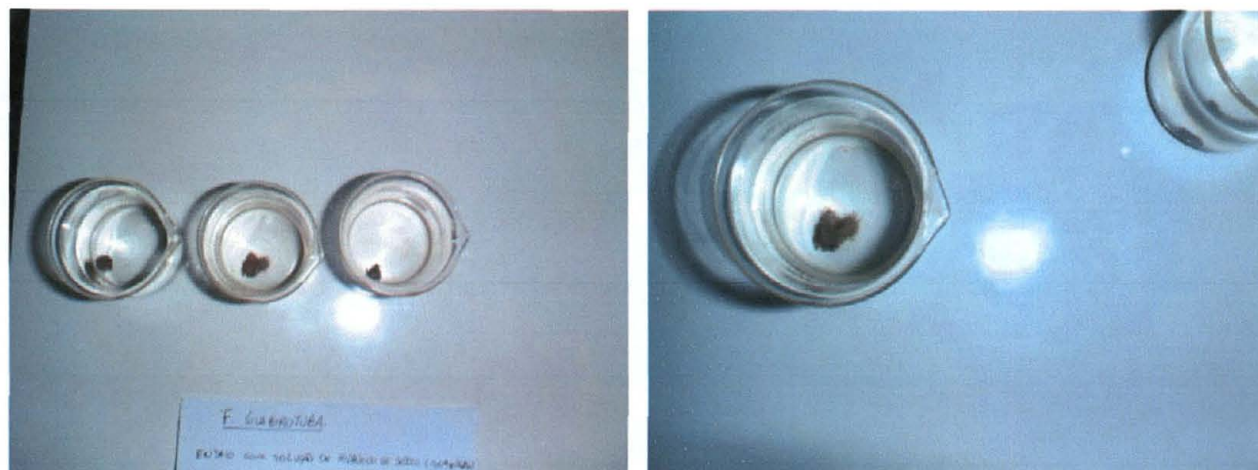
Não há cálculos a realizar, pois a análise é qualitativa, baseada apenas nas observações das reações ocorridas (SHERARD et al., 1976a; HEAD, 1994; ABNT,



1996a). Atribui-se um grau para classificar cada torrão, conforme descrito na NBR 13601 e demais referências citadas, e resumido a seguir.

- Grau 1 – Comportamento não-dispersivo: podem ocorrer reações como absorção de água, esboroamento, formação de uma pilha de partículas no fundo, porém não ocorre turvação do líquido (Figura 7);

FIGURA 7 – ENSAIO DO TORRÃO, ARGILA COM DESAGREGAÇÃO



- Grau 2 – Comportamento levemente dispersivo: apenas indícios de turvação no líquido, próximos à superfície do torrão;
- Grau 3 – Comportamento moderadamente dispersivo: formação de uma nuvem de colóides em suspensão, geralmente veios finos espalhando-se no fundo do béquer, facilmente reconhecível;
- Grau 4 – Comportamento fortemente dispersivo: formação de uma nuvem coloidal, geralmente uma película muito fina, cobrindo o fundo do béquer (Figura 8) podendo, em alguns casos, turvar todo o líquido.

Considerando o comportamento médio dos torrões, a norma recomenda classificar o solo como não-dispersivo para os graus 1 e 2, e como dispersivo para os graus 3 e 4.

- Pontos de Verificação

No caso de torrões talhados a partir de amostras compactadas, os resultados podem ser influenciados pelo seu procedimento de preparação (SHERARD et al., 1976b; VERTAMATTI, 1988; BOSZCZOWSKI, 2001; KORMANN, 2002).

FIGURA 8 – ENSAIO DO TORRÃO, SOLO ARENOSO COM DISPERSÃO



Portanto, a possibilidade de influência da preparação constitui um ponto de verificação, para ensaio realizado com amostra remoldada. Para materiais que podem ter suas características modificadas pela secagem e destorroamento convencionais, essas operações devem ser evitadas.

- Causas Prováveis de Erros

Conforme o tipo de solo e suas condições, a forma de colocar o torrão no béquer no início do ensaio pode conduzir a erros nas observações. Se o torrão for solto na superfície do líquido, seu choque contra o fundo do béquer pode provocar a abertura de trincas e fraturas já existentes. Esse é o procedimento previsto na norma e foi adotado nos ensaios. Se for posicionado primeiramente o torrão no béquer, para depois inserir o líquido, a agitação pode falsear resultados, especialmente a observação da distribuição da nuvem coloidal. Uma colher ou uma pinça adequadas para colocar suavemente o torrão no fundo do béquer, poderia permitir a operação com menor risco de erro.

- Responsabilidades

A realização do ensaio é simples, mas exige cuidados. Deve ser realizado por técnico, ou estagiário supervisionado por técnico, com treinamento e prática desenvolvidos em laboratório de geotecnia. A aprovação final deve ser responsabilidade de engenheiro ou pesquisador da área de geotecnia.

- Anexos

A planilha de ensaio está apresentada ao final (Anexo 1).

### 6.2.2 Ensaio Sedimentométrico Comparativo (Dispersão SCS)

- Objetivo e Aplicabilidade

O objetivo desse procedimento é a avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo, também conhecido como ensaio de dispersão SCS, iniciais de *"Soil Conservation Service"*. É um ensaio semelhante ao de granulometria normatizado pela NBR 7181, porém não é utilizada a agitação mecânica nem o agente dispersante (defloculante), no procedimento de sedimentação. A comparação entre os resultados dos ensaios realizados por esses dois procedimentos, fornece uma medida da dispersibilidade de solos argilosos.

A análise baseia-se no grau de dispersão das partículas de argila, provocada pela preparação prévia da amostra com agitação mecânica e adição de defloculante. A fração argilosa da amostra será tanto mais dispersiva, quanto mais próximo for o resultado dos testes realizados com e sem essa preparação prévia.

Sua principal aplicação ocorre em estudos de erosão hídrica de argilas ou de outros solos que contenham mais de 12% de fração argila, segundo classificação obtida ao ser analisado o resultado de ensaio segundo a NBR 7181.

- Normas e Documentos Complementares

*Normas:*

- ABNT - NBR 13602/1996 Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS – Método de ensaio;
- ABNT – NBR 7181/1984 (e errata de 1988) – Solo – Análise granulométrica – Método de ensaio;
- NBR NM-ISO 2395/1997 – Peneiras de ensaio e ensaio de peneiramento – Vocabulário;
- NBR NM-ISO 3310-1/1997 – Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico;
- NBR NM-ISO 3310-2/1997 – Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação Parte 2: Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada;
- ABNT – NBR 6457/1986 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – Método de ensaio;
- ABNT - NBR 6508/1984 - Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica.

*Documentos complementares:*

- DNER-ME 093/94 Solos – determinação da densidade real;
- (HEAD, 1994);
- (SHERARD et al., 1976a).

- Definições

Dispersão ou defloculação das argilas em presença de água: (ver item 6.2.1).

- Amostra

A amostra de solo pode ser remoldada, porém é conveniente que seja mantida sua umidade natural. O solo a ser ensaiado é cerca de 200g de material, passado na peneira de 2,0 mm de abertura de malha. Caso a umidade esteja muito elevada, pode ser utilizada mão de gral para forçar o material através da peneira. Se necessário, o material pode ser secado até uma umidade em torno do seu limite de plasticidade.

Do material passado na peneira de 2,0 mm, cerca de 100g é utilizado para determinação da umidade higroscópica, e o material restante é a amostra a ser ensaiada.

Tendo em vista a necessidade de realizar também o ensaio rotineiro de peneiramento fino e sedimentação conforme a NBR 7181, a amostra a ser preparada deve considerar o que preconiza esta norma. Trata-se de obter 120 g no caso de solos arenosos, ou 70 g para os siltosos e argilosos, passados na peneira de 2,0 mm, conforme as normas NBR 6457 e NBR 7181.

A amostra indeformada de argila foi mantida em câmara úmida, até o momento de sua preparação, conforme descrição anterior. A amostra de solo arenoso já tinha sido seca ao ar e destorroada anteriormente, impossibilitando a adoção do procedimento recomendado pela norma.

- Equipamentos e Materiais Utilizados:

- a) provetas de vidro graduadas até 1000 ml a 20°C;
- b) densímetro de bulbo simétrico, graduado de 0,995 a 1,050, com resolução de 0,001, calibrado a 20°C;
- c) tanque para imersão das provetas a temperatura constante durante o ensaio, ou controle ambiental de temperatura;
- d) peneiras circulares, de malhas quadradas, com aberturas de 2,0mm, 1,2mm, 0,6mm, 0,42mm, 0,25mm, 0,15mm, 0,075mm, de acordo com a NBR 5734;
- e) agitador de peneiras;
- f) kitassato ou picnômetro de 500 cm<sup>3</sup>;
- g) bomba de vácuo, capaz de aplicar vácuo de 88 kPa, para remoção do ar aderente às partículas de solo;
- h) demais equipamentos e materiais usuais, como estufa, dessecador, balança, termômetro, cronômetro, escova, béquer, espátula, baqueta de vidro, proveta graduada de 250 ml, bisnaga, funil e cápsulas.

Tratam-se, com poucas exceções, de equipamentos idênticos aos utilizados no ensaio convencional de análise granulométrica. A bomba de vácuo descrita é o equipamento rotineiramente utilizado no ensaio de determinação da densidade real das



partículas sólidas do solo, conforme a NBR 6508. Pode ser substituído por um compressor de ar e um sistema que faz com que o ar comprimido produza sucção na saída.

- Instruções ou Procedimentos

*Preparação da amostra:*

É necessário preparar duas amostras do mesmo material conforme descrito anteriormente, sendo uma para o ensaio rotineiro de análise granulométrica por sedimentação e peneiramento fino conforme a NBR 7181, e a outra para o ensaio sedimentométrico comparativo segundo a NBR 13602. Ambas são passadas na peneira 2,0 mm. O ensaio convencional não será aqui detalhado, por se tratar de procedimento rotineiro.

Para o ensaio sedimentométrico comparativo separa-se, por quarteamento, uma quantidade de amostra correspondente a cerca de 25 g de material seco, corrigindo o peso do material úmido em função da umidade higroscópica previamente determinada.

Foi feita uma tentativa de comparação de resultados obtidos em ensaios com diferentes maneiras de preparação de amostras, para a argila estudada. Tanto o ensaio convencional com defloculante, como o ensaio sedimentométrico comparativo, foram repetidos para amostras preparadas com secagem ao ar e destorroamento prévios, e para amostras preparadas por via úmida. Na preparação convencional deixa-se a amostra secando ao ar até atingir aproximadamente a umidade higroscópica. Em seguida é destorroada no almofariz. Na preparação por via úmida o solo é mantido em sua umidade natural ou, se necessário, acrescenta-se água destilada. O destorroamento é feito desagregando-se os torrões com as mãos utilizando-se, no máximo, uma peneira para auxiliar na operação.

*Ensaio:*

Coloca-se a amostra de solo separada para o ensaio sedimentométrico comparativo no picnômetro. Acrescenta-se 125 ml de água destilada ao picnômetro, conectando-o em seguida a bomba de vácuo, onde deve permanecer durante dez minutos para remoção de ar (Figura 9.a).

Desse ponto em diante, o procedimento do ensaio é o mesmo do ensaio convencional de sedimentação, conforme descrição a seguir.

Todo o material é transferido para a proveta, completando-se 1000 ml de solução com água destilada. Com uma das mãos tapa-se a boca da proveta e, com a outra, comprime-se a sua base. Durante um minuto imprime-se à proveta movimentos de rotação, passando-se a boca da proveta de cima para baixo e vice-versa (Figura 9.b).

FIGURA 9 – ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO, INÍCIO



a) Remoção de ar



b) Agitação da solução na proveta

Coloca-se a proveta sobre a bancada e, imediatamente, aciona-se o cronômetro, marcando o início da sedimentação. Simultaneamente, o densímetro mantido em água limpa numa proveta auxiliar, é retirado e mergulhado na suspensão (Figura 10.a). Efetuam-se as três leituras iniciais do densímetro, nos tempos correspondentes a 0,5 minuto, 1 minuto e 2 minutos, contados do início da sedimentação. Retira-se o densímetro e repetem-se as operações iniciais, desde a agitação até a leitura correspondente a 2 minutos de sedimentação, tantas vezes quanto for necessário para obter uma certa repetitividade nas três primeiras leituras densimétricas.

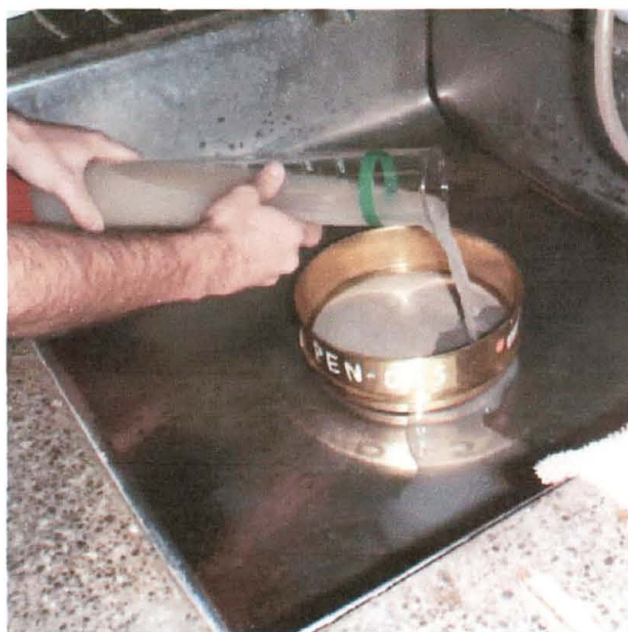
Atendida essa condição prossegue-se o ensaio, retirando-se cuidadosamente o densímetro da suspensão após a leitura correspondente a 2 minutos de sedimentação,

transferindo-o para a proveta auxiliar. Os ensaios foram realizados em laboratório com temperatura ambiente constante e controlada. Caso contrário, a proveta teria que ser mantida em banho a temperatura constante, até a última leitura.

FIGURA 10 – ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO, ETAPAS



a) Leituras de densidade e temperatura



b) Peneiramento e lavagem na peneira de 0,075mm

As leituras densimétricas subseqüentes deverão ser realizadas a 4, 8, 15 e 30 minutos e 1, 2, 4, 8 e 24 horas, considerando-se os tempos decorridos do início da sedimentação. A cada leitura densimétrica, exceto as duas primeiras, mede-se a temperatura mergulhando-se o termômetro na suspensão.

Após a última leitura o conteúdo da proveta é passado e lavado na peneira de 0,075 mm (Figura 10.b). O material retido, após secagem em estufa até constância de massa, deve ser passado na série de peneiras constituída, no mínimo, pelas peneiras 1,2mm, 0,6mm, 0,42mm, 0,25mm, 0,15mm e 0,075mm. Pesa-se o material retido em cada peneira.

*Cálculos:*

- a) calcula-se a porcentagem de material em suspensão correspondente a cada leitura do densímetro, referida à massa total da amostra, com a equação:



$$Q_s = \frac{\delta}{\delta - \delta_a} \times \frac{V \times \delta_c \times (L - L_a)}{\frac{100 \times M_h}{100 + h}} \quad (4)$$

onde:

$Q_s$  = porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro;

$\delta$  = densidade de massa dos grãos do solo, determinada através de ensaio específico;

$\delta_a$  = densidade de massa da água, à temperatura de ensaio que, de acordo com as normas NBR 7181 e NBR 13602, pode ser considerada igual a 1,0 g/cm<sup>3</sup> para efeito de cálculo;

$V$  = volume da suspensão, a ser considerado igual a 1000 cm<sup>3</sup> no cálculo, conforme as normas citadas;

$\delta_c$  = densidade de massa da água, à temperatura de calibração do densímetro (20°C ), considerada igual a 1,0 g/cm<sup>3</sup> nas normas já citadas;

$L$  = leitura do densímetro na suspensão;

$L_a$  = leitura do densímetro em água destilada, na mesma temperatura da suspensão;

$M_h$  = massa do material úmido submetido à sedimentação;

$h$  = umidade higroscópica da amostra, determinada da forma rotineira com auxílio da estufa.

O valor de " $L_a$ " , leitura do densímetro em água destilada, depende apenas da temperatura da suspensão no momento de cada leitura densimétrica durante o ensaio. É obtido de uma curva de variação de leituras, previamente determinada para o densímetro a ser utilizado no ensaio. Uma proveta com 1000 ml de água destilada, imersa em banho com dispositivo de controle de temperatura, permite obter leituras densimétricas a temperaturas variadas, necessárias para traçar a curva de variação. Os resultados podem diferir da curva utilizada no ensaio rotineiro de granulometria. Na análise granulométrica convencional, realizada segundo a NBR 7181, essa curva é obtida com a solução constituída por água e pelo agente defloculante a ser utilizado no ensaio.

b) calcula-se o diâmetro máximo das partículas em suspensão, no momento de cada

leitura do densímetro, utilizando-se a equação da lei de Stokes:

$$d = \sqrt{\frac{1800\eta}{\delta - \delta_a} \times \frac{a}{t}} \quad (5)$$

onde:

d = diâmetro máximo das partículas;

$\eta$  = coeficiente de viscosidade da água à temperatura de ensaio;

a = altura de queda das partículas correspondente à leitura do densímetro;

t = tempo de sedimentação, em s, correspondente a cada leitura densimétrica.

O valor do coeficiente “ $\eta$ ”, viscosidade da água, para diferentes temperaturas, é apresentado na norma NBR 13602 através da seguinte tabela:

TABELA 1 – COEFICIENTE DE VISCOSIDADE DA ÁGUA ( VALORES EM  $10^{-6} \text{ g} \times \text{s} / \text{cm}^2$  )

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	13,36	12,99	12,63	12,30	11,98	11,68	11,38	11,09	10,81	10,54
20	10,29	10,03	9,80	9,56	9,34	9,13	8,92	8,72	8,52	8,34
30	8,16	7,98	7,82	7,66	7,50	7,45	7,20	7,06	6,92	6,79

FONTE: ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas

O valor de “a”, altura de queda correspondente a cada leitura densimétrica, é o mesmo utilizado no ensaio de granulometria realizado conforme a NBR 7181. Exige a construção das curvas de variação da altura de queda das partículas em função da leitura do densímetro utilizado no ensaio, conforme descrito na norma citada.

c) calcula-se a porcentagem de materiais que passam nas peneiras, utilizando-se a equação:

$$Q_t = \frac{M_h \times 100 - M_i \times (100 + h)}{M_h \times 100} \quad (6)$$

onde:

$Q_t$  = porcentagem de material passando em cada peneira;

$M_h$  = massa de material úmido submetido ao ensaio;

h = umidade higroscópica da amostra;

$M_i$  = massa de material retido acumulado em cada peneira.

d) com os valores calculados, obtém-se a curva granulométrica da maneira usual.

Convém desenhar essa curva junto da obtida no ensaio realizado com a mesma amostra segundo a NBR 7181. Considera-se que o solo estudado é tanto mais dispersivo, quanto menor for a diferença entre as duas curvas em seu trecho correspondente à fração mais fina. A aproximação entre as duas curvas nesse trecho, indica que a argila deflocula de maneira semelhante tanto em presença de água, como quando é submetida a agitação mecânica e ao agente dispersante.

e) para exprimir essa comparação quantitativamente, calcula-se a porcentagem de dispersão da seguinte maneira:

$$\text{Porcentagem de dispersão (\%)} = \left( \frac{A}{B} \right) \times 100 \quad (7)$$

onde:

A = porcentagem, em massa, de partículas de argila, determinada no ensaio sedimentométrico comparativo;

B = porcentagem, em massa, de partículas de argila, determinada no ensaio de granulometria convencional, conforme a NBR 7181.

Porcentagem de dispersão igual a 100% indica uma fração argila completamente dispersiva, e igual a zero uma fração argila não dispersiva (ABNT, 1996b).

A proposta para avaliação da erodibilidade em função da porcentagem de dispersão, apresentada por Araújo (2000), é a seguinte:

20% < Porcentagem de dispersão < 25%: Erodibilidade média

25% < Porcentagem de dispersão < 50%: Erodibilidade alta

50% < Porcentagem de dispersão : Erodibilidade muito alta

Dúvidas surgem no cálculo, devido a diferença na consideração do diâmetro de partícula representativo da fração argila. Head (1994), indica a determinação dos valores de A e de B no diâmetro correspondente a 0,002 mm. Em Sherard et al. (1976a) e na NBR 13602 é considerado, para o mesmo fim, o diâmetro 0,005 mm. Trata-se somente de uma diferença no critério de classificação das partículas de solo quanto à sua granulometria.

Porém, no caso da norma brasileira esse critério indica uma incoerência. A norma que apresenta a classificação geotécnica de solos é a NBR 6502. Em sua versão anterior, o diâmetro de partícula 0,005 mm era adotado como o limite superior para a fração argila, coincidindo com o critério de Sherard et al. (1976a) e da NBR 13602. Em sua revisão mais recente (ABNT, 1995), o limite passou a ser considerado como 0,002 mm, que é igual ao valor adotado por Head (1994). A incoerência citada, advém do fato que a NBR 13602 (1996) é posterior à revisão da terminologia de solos e rochas (ABNT, 1995).

Bastos (1999) apresenta um critério de avaliação de erodibilidade, e não de dispersão, com base na razão de dispersão estabelecida por Middleton em 1930. A razão de dispersão é calculada de forma semelhante à porcentagem de dispersão, porém com base nas porcentagens de partículas menores do que o diâmetro 0,05 mm. Dessa maneira envolve partículas de argila e de silte, que são as frações menores do que 0,06 mm de acordo com a NBR 6502. Segundo esse critério, solos com razão de dispersão superior a 15% são erodíveis.

A razão de dispersão (RD) é:

$$RD (\%) = \frac{\% < 0,05mm \text{ sem defloculante (SCS)}}{\% < 0,05mm \text{ com defloculante (granulometria)}} \times 100 \quad (8)$$

- Pontos de Verificação

Conforme observado por diversos pesquisadores (e.g. SHERARD et al., 1976b; VERTAMATTI, 1988; BOSZCZOWSKI, 2001) e confirmado na discussão dos ensaios apresentada no Capítulo 7, a preparação da amostra pode influir significativamente nos seus resultados (ver item 6.2.1). É o motivo pelo qual a NBR 13602 recomenda a realização de ensaios com amostra na umidade natural ou, no máximo, com secagem até umidade próxima do limite de plasticidade.

Outro ponto de verificação refere-se ao agente defloculante a utilizar no ensaio realizado de acordo com a NBR 7181, pois pode ser ineficaz para determinados tipos

de solos. No texto da norma está citada essa possibilidade, sugerindo investigar o tipo e a dosagem do defloculante mais adequado.

- Causas Prováveis de Erros

A operação de rotação da proveta para colocar o solo em suspensão deve ser cuidadosa, para evitar a perda de solução. Ao final da operação, a colocação da proveta sobre a bancada e o início da contagem do tempo devem ser realizados de forma ininterrupta. Se essa recomendação for atendida, toda a solução tenderá a apresentar uma densidade uniforme e próxima da média no momento do acionamento do cronômetro. Do contrário, a curva granulométrica resultante pode apresentar descontinuidade significativa entre os trechos correspondentes ao ensaio de peneiramento e o de sedimentação. Essa não é a única, mas pode ser uma das causas dessa descontinuidade.

Devido à semelhança com o ensaio convencional de granulometria, realizado segundo a NBR 7181, há o risco de se esquecer ou subestimar as diferenças no ensaio sedimentométrico comparativo. São diferenças importantes a quantidade de solo submetida ao ensaio, a preparação da amostra sem agitação mecânica e sem adição de defloculante, e a curva de variação de leituras do densímetro em função da temperatura obtida apenas em água.

- Responsabilidades

O ensaio é simples, mas exige cuidados. Deve ser realizado por técnico ou estagiário supervisionado por técnico, com treinamento e prática desenvolvidos em laboratório de geotecnia. A aprovação final deve ser responsabilidade de engenheiro ou pesquisador da área de geotecnia.

- Anexos

A planilha de ensaio está apresentada ao final (Anexo 1).

### 6.2.3 Ensaio do Furo de Agulha ("*Pinhole Test*")

- Objetivo e Aplicabilidade

O objetivo desse procedimento é a obtenção direta e qualitativa da dispersibilidade em estudos de erosão hídrica de solos argilosos, pelo fluxo de água destilada através de um pequeno furo feito axialmente no corpo de prova (SHERARD et al. 1976b). A aparência da solução que flui do corpo de prova devido a uma carga hidráulica aplicada, a medição das vazões e as dimensões finais do furo, permitem diferenciar as argilas em relação a dispersão. Nas argilas altamente dispersivas o efluente será turvo e o furo feito no corpo de prova se alargará rapidamente, resultando em um aumento de vazão mesmo com carga hidráulica constante. Nas argilas não dispersivas o efluente será límpido e o furo permanecerá inalterado. Nas argilas moderada a levemente dispersivas o furo e a vazão não se alterarão, porém o efluente será levemente turvo.

Segundo a NBR 14114, principal referência para elaboração desse procedimento, classificam-se os solos finos quanto à dispersibilidade em seis categorias:

- a) ND1 e ND2, não dispersivos a incipientemente dispersivos;
- b) ND3 e ND4, leve a moderadamente dispersivos;
- c) D2 e D1, dispersivos a altamente dispersivos.

O ensaio foi desenvolvido e divulgado por Sherard e sua equipe, através de publicações e serviços de consultoria em diversos países, incluindo o Brasil (BORDEAUX e NAKAO, 1974). Elaborado para estudar solos finos compactados, particularmente para a construção de barragens de terra (SHERARD et al., 1976b), trata-se de um teste qualitativo para identificar argilas dispersivas. Trabalhos posteriores e a norma estendem sua aplicação a amostras indeformadas. A NBR 14114 destaca que o fluxo de água e as dimensões do furo podem variar muito em corpos de prova indeformados. A estratificação, os vazios irregulares e a heterogeneidade dessas amostras pode comandar o resultado do ensaio, podendo influenciar até mais do que a dispersão da argila. A norma destaca a turbidez como o melhor atributo para analisar os resultados de ensaios em amostras indeformadas. O ensaio tem sido relacionado mais a erosão interna ou subterrânea ("*piping*"), causada pela dispersão dos solos finos, do

que com a erosão superficial. No entanto existem relatos de ocorrência de erosão mecânica com carreamento de partículas durante o ensaio (SANTOS, 1997).

- Normas e Documentos Complementares

*Normas:*

- ABNT - NBR 14114/1998 Solo – Solos argilosos dispersivos – Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (*pinhole test*);
- ABNT – NBR 6457/1986 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – Método de ensaio;
- ABNT – NBR 12007/1992 Solo – Ensaio de adensamento unidimensional – Método de ensaio;
- ABNT - NBR NM-ISO 2395/1997 – Peneiras de ensaio e ensaio de peneiramento – Vocabulário;
- ABNT - NBR NM-ISO 3310-1/1997 – Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico;
- ABNT - NBR NM-ISO 3310-2/1997 – Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 2: Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada.

*Documentos complementares:*

- (HEAD, 1994);
- (SHERARD et al., 1976b);
- (SANTOS, 1997).

- Definições

Dispersão ou defloculação das argilas em presença de água: (ver item 6.2.1).

- Amostra

O ensaio do furo de agulha pode ser realizado em amostra de solo indeformada ou em amostra remoldada, dependendo do objetivo do estudo. As considerações sobre a amostra são semelhantes às aquelas apresentadas para o ensaio de torrão (ver item 6.2.1). Para amostras compactadas, a moldagem deve ser realizada conforme o procedimento da NBR 7182, e simular as condições de peso específico e umidade que poderão ocorrer no campo.

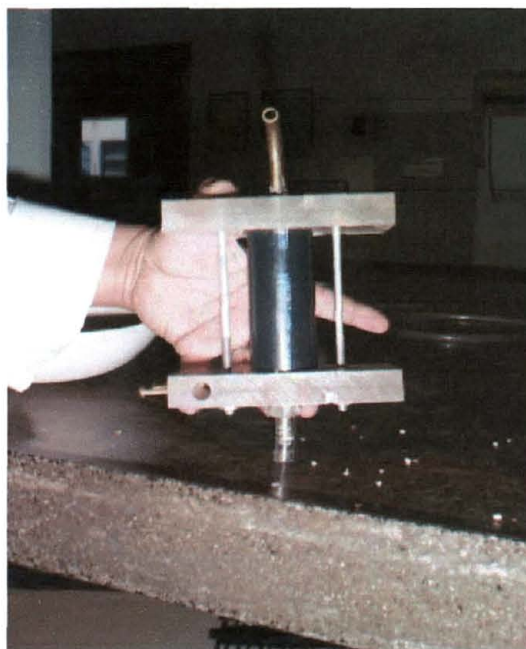
O bloco indeformado de argila, protegido por parafina e bandagem, foi guardado em câmara úmida até o momento do ensaio. A amostra de solo arenoso foi seca ao ar, destorroada e, posteriormente, compactada.

- Equipamentos e Materiais Utilizados

FIGURA 11 – ENSAIO DO FURO DE AGULHA, APARELHO *PINHOLE*



a) Montagem do aparelho



b) Aparelho pronto para o início do ensaio

a) aparelho “*pinhole*” constituído por um tubo cilíndrico, metálico ou de plástico, com diâmetro interno de aproximadamente 36 mm e altura de 100 mm, cujas extremidades devem ficar perfeitamente acopladas a bases quadradas ou retangulares (Figura 11.a). Uma das bases deve ter um orifício central para alimentação de água. A outra deve ter dois orifícios, sendo um para permitir a saída do fluxo para a proveta e o segundo para evitar formação de vácuo parcial. Foi confeccionado um aparelho no laboratório, utilizando-se um segmento de tubo de PVC rígido e placas de acrílico coladas e trabalhadas para formar as bases. Dois parafusos laterais longos permitem acoplar e fixar o conjunto de bases e tubo, de modo a constituir o aparelho (Figura 11.b);



- b) tanque para fornecimento de água destilada a carga constante, com pH entre 5,5 e 7,0;
- c) dispositivo para controlar e medir a carga hidráulica aplicada. Foi confeccionado um copo de acrílico com diâmetro interno de 144 mm e altura de 114 mm, dotado de um “ladrão” constituído por um tubo vertical central conectado a uma saída de fundo. Uma haste vertical de madeira permite a fixação do copo em diversas alturas em relação ao aparelho, de modo a dotar o sistema da carga hidráulica pretendida em cada etapa do ensaio. O copo, intercalado entre o tanque de água e o aparelho “*pinhole*”, faz o controle da carga hidráulica, que é medida em um tubo de vidro graduado acoplado ao aparelho na entrada do fluxo;
- d) provetas graduadas de 10 cm<sup>3</sup>, 25 cm<sup>3</sup>, 50 cm<sup>3</sup> e 100 cm<sup>3</sup> de capacidade;
- e) telas de arame de formato circular, com abertura de malha menor que 2 mm e diâmetro aproximadamente igual a 35 mm;
- f) agulha hipodérmica de aço de 1 mm de diâmetro externo e comprimento de 50 a 75 mm;
- g) guia de centralização plástico ou metálico, em forma de tronco de cone e dotado de orifício de 1,5 mm de diâmetro;
- h) molde de madeira constituído por um cilindro com diâmetro de 35,0 mm e comprimento de 55,4 mm, para auxiliar na moldagem de corpos de prova compactados e no posicionamento de corpos de prova indeformados;
- i) areia grossa lavada que passa na peneira 4,8mm e fica retida na peneira de 2,0mm;
- j) equipamentos para compactar amostras, através do método Harvard Miniatura, ou compactação estática como, por exemplo, compressão do solo com auxílio da prensa para ensaio de compressão simples, ou ainda compactação dinâmica de forma semelhante ao que preconiza a NBR 7182;
- k) equipamentos para talhar e tornear corpos de prova, conforme a NBR 12007;
- l) materiais diversos de laboratório, como peneira de 2,0 mm, cronômetro, água destilada, cápsulas metálicas, recipientes de porcelana, espátula, paquímetro, balanças.

- Instruções ou Procedimentos

*Preparação da amostra:*

São talhados ou moldados, conforme o caso em estudo, corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 35 mm e altura de 38 mm. Foram ensaiados corpos de prova talhados da argila e compactados do solo arenoso.

No caso de corpo de prova indeformado, pesa-se o tubo cilíndrico vazio do aparelho “*pinhole*” e lubrifica-se sua face interna. Talha-se o corpo de prova com 38 mm de comprimento, ajustado ao cilindro de ensaio. O processo de talhagem, torneando o corpo de prova rente ao topo do cilindro e introduzindo-o por leve pressão uniforme (Figura 12), está descrito na NBR 12007. De sua boa execução depende a importante estanqueidade entre o solo e o tubo. Determina-se a umidade do corpo de prova com as aparas de solo resultantes da talhagem.

FIGURA 12 – ENSAIO DO FURO DE AGULHA, CORPO DE PROVA TALHADO DA ARGILA



No caso de corpo de prova compactado, são previamente removidas as partículas maiores do que 2,0 mm e determinada a umidade da amostra, de acordo com a NBR 6457. Se necessário, corrige-se essa umidade até atingir não mais que dois pontos percentuais de diferença da umidade de compactação desejada, com homogeneização e cura por 24 horas em saco plástico fechado caso seja acrescentada água para correção. Compacta-se o corpo de prova no interior do tubo cilíndrico do aparelho “*pinhole*”, verificando se a massa específica aparente seca é a pretendida

para o ensaio. As condições adotadas para o estudo do solo arenoso foram massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, obtidas no ensaio de compactação, conforme a NBR 7182. Foram moldados corpos de prova nessas condições, no tubo do aparelho "pinhole" com o molde cilíndrico de madeira como soquete (Figura 13).

FIGURA 13 – ENSAIO DO FURO DE AGULHA, CORPO DE PROVA MOLDADO DO SOLO ARENOSO



a) Compactação



b) Corpo de prova pronto

Santos (1997), em trabalho anterior à publicação do texto definitivo da NBR 14114, propõe alguns procedimentos que diferem desta norma e que são frequentemente utilizados (BASTOS, 1999; SILVA e LACERDA, 2001). Na preparação de amostras propõe a inundação prévia dos corpos de prova, para evitar a absorção da água que penetra no aparelho e eliminar as forças de sucção que podem alterar os resultados. A discussão da validade desse procedimento está apresentada no capítulo 7, no ensaio Inderbitzen. A inundação do corpo de prova pode ser realizada submetendo-o previamente a uma carga hidráulica mínima no próprio aparelho, ou por imersão em água.



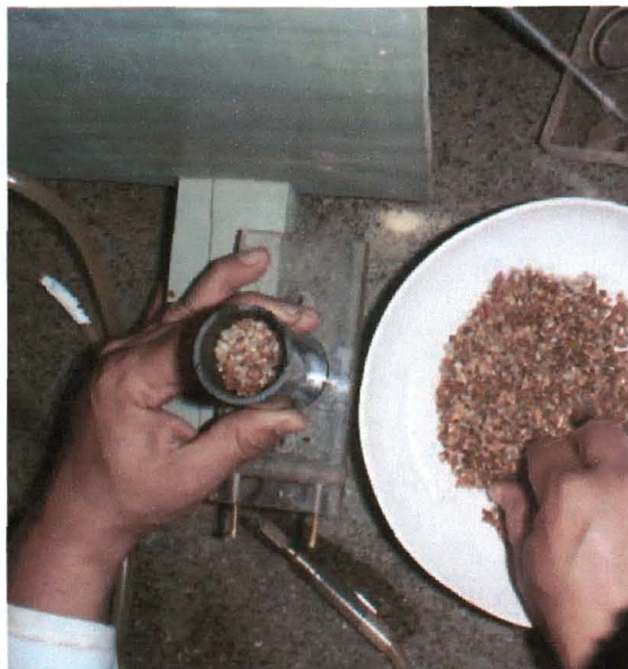
### Ensaio:

Colocam-se duas telas de arame sob a base do corpo de prova dentro do tubo, e preenche-se com a areia grossa peneirada e lavada o espaço anteriormente ocupado pelo molde de madeira. Ajusta-se a base do aparelho "pinhole" que contém o orifício de saída do fluxo, garantindo sua estanqueidade no contato com o tubo.

FIGURA 14 – ENSAIO DO FURO DE AGULHA, FINAL DA PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA



a) Perfuração com agulha hipodérmica



b) Preenchimento com areia grossa lavada

Insere-se verticalmente com pressão dos dedos o guia de centralização no centro da face oposta do corpo de prova, até que fique nivelado com a superfície do solo. O guia, adequadamente instalado, garante que o furo de agulha ficará centralizado e normal à superfície do solo. Em solos muito resistentes o guia pode deixar de ser utilizado, desde que cuidados especiais sejam tomados na cravação da agulha, devendo uma observação a respeito ser inserida no relatório do ensaio.

A agulha é inserida no corpo de prova através do guia, forçando-a e girando-a se necessário, até atravessar a amostra, a tela e cerca de 10 mm da areia (Figura 14.a). Em seguida é retirada com giros, para garantir que o furo no solo fique aberto e limpo.

Colocam-se duas telas de arame no topo do corpo de prova e preenche-se o vazio remanescente com areia grossa lavada (Figura 14.b). Ajusta-se a segunda base do aparelho “*pinhole*”, que contém o orifício de entrada de água, cuidando com a estanqueidade no contato entre o tubo e a base. Conecta-se a mangueira de alimentação de água ao aparelho (Figura 15.a), colocando-o na posição horizontal. A entrada de água deve estar fechada e o controle de carga hidráulica aberto. As tubulações devem estar saturadas e sem bolhas de ar.

FIGURA 15 – ENSAIO DO FURO DE AGULHA, ANDAMENTO



a) Aparelho “*pinhole*”



b) Medida da vazão durante o ensaio

Inicia-se o ensaio introduzindo água destilada no aparelho, de modo que a carga hidráulica no nível do furo de agulha seja igual a 50 mm e aciona-se o cronômetro. Com a proveta mede-se a quantidade de efluente que sai do corpo de prova (Figura 15.b). Caso não ocorra o fluxo, o aparelho precisa ser desmontado e o furo de agulha refeito. Mede-se, por três vezes, o tempo necessário para se coletar 10 cm<sup>3</sup> de efluente. Nas medidas seguintes anotam-se os tempos necessários para se coletar 25 cm<sup>3</sup>, 50 cm<sup>3</sup> ou

100 cm<sup>3</sup> de efluente. Os volumes maiores destinam-se aos casos em que a vazão é elevada e, conseqüentemente, diminui o tempo disponível para as leituras, dificultando a precisão e aumentando o risco de erros de operação e registro. Em caso de fluxo muito pequeno, os tempos prolongados impedem a realização de um número significativo de leituras nos tempos previstos pela norma. Nesse caso é aceitável medir o volume coletado num intervalo adotado, por exemplo, em 60 segundos. Observa-se o efluente na proveta a cada medida de vazão, classificando-o visualmente como escuro, levemente escuro ou claro. Deve-se trocar de proveta cada vez que for realizada a observação. A NBR 14114 descreve os passos do ensaio que conduzem à classificação final do solo.

Em 5 minutos de percolação sob a carga hidráulica de 50 mm, ocorre a principal diferenciação entre solos dispersivos e não dispersivos, com três alternativas possíveis de procedimento a seguir.

Se o efluente estiver turvo e assim permanecer por mais 5 minutos sob a mesma carga, o ensaio pode ser encerrado ao fim dos 10 minutos. O solo é dispersivo e, em conseqüência, as vazões aumentam rapidamente durante o ensaio, atingindo cerca de 1,5 cm<sup>3</sup>/s a 2,0 cm<sup>3</sup>/s, que é a capacidade hidráulica máxima do equipamento (ABNT, 1998; SHERARD et al., 1976b). Quando é possível a retirada do corpo de prova do aparelho (Figura 16.a) e seu corte ao meio sem grandes danos, mede-se com o paquímetro o tamanho do furo após o ensaio (Figura 16.b). Se for maior que 2,0 mm, classifica-se o solo como altamente dispersivo, com símbolo D1. Se for menor que 2,0 mm demonstra inconsistência de resultados e o ensaio deve ser repetido.

Se o efluente for levemente escuro ao final de duas etapas de 5 minutos, conclui-se o ensaio ao final dos 10 minutos. Classifica-se o solo como dispersivo, D2, se a vazão final for maior que 1,0 cm<sup>3</sup>/s e o tamanho final do furo maior do que 2,0 mm. Porém, se a vazão for menor que 0,8 cm<sup>3</sup>/s e o tamanho do furo não exceder 1,5 mm, classifica-se o solo como moderadamente dispersivo, ND4.

E, finalmente, se o efluente for claro ou com leves traços de coloração após os 5 minutos iniciais do ensaio, passa-se para a carga hidráulica seguinte. O fluxo normalmente estará entre 0,3 cm<sup>3</sup>/s e 0,6 cm<sup>3</sup>/s.



FIGURA 16 – ENSAIO DO FURO DE AGULHA, FINAL



a) Retirada do corpo de prova



b) Observação do furo no corpo de prova seccionado

Sob a nova carga hidráulica, de 180 mm, duas são as alternativas possíveis de procedimentos a serem seguidos, sendo que em ambos a etapa tem apenas 5 minutos de duração. Se o efluente for escuro ou levemente escuro e o fluxo aumentar rapidamente, retira-se e abre-se o corpo de prova para observar o furo. Se o diâmetro for maior que 2,0 mm e a vazão for maior que  $2,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ , classifica-se o solo como levemente dispersivo, ND3. Se o fluxo continuar claro após 5 minutos, passa-se para a carga hidráulica seguinte. Para efeito de controle, sabe-se que a vazão normalmente será menor que  $1,8 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

Repetem-se as duas alternativas da etapa anterior, ao longo de 5 minutos de ensaio sob a nova carga de 380 mm. Se o fluxo se tornar escuro ou levemente escuro, ou se a vazão aumentar para  $3,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ , abre-se o corpo de prova para observar o diâmetro do furo. Se este chegar a 2,0 mm, classifica-se o solo como levemente dispersivo, ND3. Se o fluxo continuar claro, passa-se para a carga seguinte. A vazão será normalmente menor que  $2,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

Após 5 minutos sob a última carga hidráulica, de 1020 mm, se o efluente apresentar uma leve turbidez ou se a vazão exceder  $5,0 \text{ cm}^3/\text{s}$ , classifica-se o solo como incipientemente dispersivo, ND2. Caso contrário, classifica-se o solo como não

dispersivo, ND1. A vazão é geralmente menor que  $4,0 \text{ cm}^3/\text{s}$  e o diâmetro do furo não é sensivelmente superior ao da agulha.

Foi adotada a complementação proposta por Santos (1997), que consiste em realizar etapas igualmente controladas durante a retirada da carga hidráulica aplicada. Após a conclusão do procedimento descrito para a carga hidráulica de 1020 mm, aplicam-se em ordem decrescente os mesmos estágios de carga anteriores, de modo a permitir comparar, para cada uma, as medidas de vazão entre o acréscimo (carregamento) e a redução (descarregamento) de carga hidráulica. Os solos erosivos, especialmente sob a ação das cargas hidráulicas mais elevadas, tendem a apresentar vazão maior na fase de redução em relação a de acréscimo de carga hidráulica.

#### *Cálculos:*

Além dos cálculos de umidade e massa específica aparente seca do corpo de prova, devem ser calculadas as vazões para cada leitura.

A NBR 14114 apresenta dois gráficos para o relatório de ensaio. O primeiro é constituído por uma curva “vazão *versus* tempo médio do intervalo de medição”, para cada carga hidráulica aplicada. A variação da vazão para uma carga hidráulica constante, indica a ocorrência de erosão. O segundo é o gráfico “vazão *versus* carga hidráulica”, para o conjunto de etapas do ensaio. Adotou-se a proposta de Santos (1997), de traçar no mesmo gráfico a curva de “carregamento” (cargas hidráulicas crescentes) e de “descarregamento” (cargas hidráulicas decrescentes). A coincidência entre as duas curvas é a indicação de que o solo não é erosivo. Se a curva “descarregamento” resultar acima (vazões maiores) da curva “carregamento”, fica caracterizada a erosão ocorrida nas etapas de acréscimo de carga hidráulica.

- **Pontos de Verificação**

A etapa de preparação de amostras remoldadas é um ponto de verificação a ser considerado no ensaio, conforme descrito anteriormente (ver item 6.2.1).

No caso de amostras indeformadas, bem como as compactadas fora do tubo do aparelho “*pinhole*”, o torneamento e a introdução no tubo devem ser cuidadosos, para evitar a alteração do estado do solo e o fluxo entre o solo e a parede do tubo.



A compactação de corpos de prova dentro do cilindro do aparelho também requer cuidados na execução, para garantir a homogeneidade e a condição pretendida para o solo.

- Causas Prováveis de Erros

Sherard et al. (1976b) destacam dois casos em que podem ocorrer resultados duvidosos. Uma manobra inadequada com a agulha na perfuração do corpo de prova, produzindo furo maior que o padrão, pode ser a causa de elevada vazão do efluente. O inchamento de um solo expansivo diante do incremento da umidade pode provocar a redução do diâmetro do furo e, conseqüentemente, da vazão. Conforme apresentado adiante (Capítulo 7), ambos os casos podem ter ocorrido nos ensaios realizados.

- Responsabilidades

As etapas de preparação da amostra e realização do ensaio exigem treinamento e prática desenvolvidos em laboratório de geotecnia. Sua realização deve envolver técnicos dessa área, ou estagiários com treinamento específico e supervisão de técnicos. A verificação deve, de preferência, ser feita por técnicos da área de geotecnia. A aprovação final deve ser responsabilidade de engenheiro ou pesquisador da área de geotecnia.

- Anexos

A planilha do ensaio está apresentada ao final (Anexo 1).

#### 6.2.4 Análise Química da Água Intersticial do Solo

- Objetivo e Aplicabilidade

O objetivo desse procedimento é a avaliação da dispersibilidade de solos argilosos, por meio de ensaios químicos em amostra da solução intersticial extraída da amostra. Determinam-se as quantidades dos principais cátions metálicos presentes, avaliando a porcentagem de sódio e a quantidade total de sais (sódio, potássio, cálcio e magnésio) dissolvidos na água extraída do solo.

A dispersão está associada, principalmente, com a relação entre cátions de sódio e a soma dos cátions de sódio, potássio, cálcio e magnésio dissolvidos na água

intersticial. O sódio aumenta a espessura da camada dupla de água difusa que envolve as partículas individuais de argila. Resulta uma redução nas forças de atração entre partículas, podendo ser destacadas da massa de argila com mais facilidade.

Tendo em vista a disponibilidade de equipamentos para realizar três métodos diferentes de análise da água intersticial nos laboratórios do LACTEC, decidiu-se comparar seus resultados para a argila ensaiada. São eles absorção atômica, cromatografia iônica e a combinação de titulação com fotometria de chama.

- Normas e Documentos Complementares

*Normas:*

- ABNT - NBR 13603/1996 Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos, por meio de ensaios químicos em amostra da água intersticial – Método de ensaio;
- ABNT – NBR 6459/1984 - Determinação do limite de liquidez – Método de ensaio.

*Documentos complementares:*

- (HEAD, 1994);
- (SHERARD et al., 1976a);
- (SILVEIRA et al., 1974).

- Definições

Dispersão ou defloculação das argilas: (ver item 6.2.1).

- Amostra

A amostra de solo pode ser remoldada, porém é conveniente que seja mantida sua umidade natural. Uma fração representativa dessa amostra é utilizada para a extração da água intersticial. A quantidade é variável para cada caso, conforme detalhado a seguir, pois deve ser suficiente para permitir a extração de água intersticial necessária para a análise química.

A amostra indeformada de argila foi mantida na umidade natural e em câmara úmida, conforme descrito anteriormente. Como a amostra do solo arenoso já tinha sido seca ao ar e destorroada anteriormente, não foi possível seguir o procedimento recomendado pela norma.

- Equipamentos e Materiais Utilizados:

- a) funil de Büchner: em função da quantidade de material e da espessura da camada de solo a ser submetido ao vácuo, os melhores resultados foram obtidos com um funil de cerca de 130 ml de capacidade, com aproximadamente 8 cm de diâmetro e 3 cm de altura da borda (Figura 17.a);
- b) kitassato com rolha perfurada: foi utilizado um kitassato com capacidade de cerca de 1200 ml e altura de aproximadamente 24 cm, permitindo que os tubos de ensaio ficassem suspensos em seu interior ou apoiados no fundo;
- c) tubo de ensaio: foram utilizados tubos de ensaio com capacidade de 28 ml e altura de 15 cm;
- d) bomba de vácuo capaz de aplicar vácuo de 88 kPa: utilizou-se um compressor de ar com um sistema acoplado na saída, para produzir sucção na passagem do ar comprimido (Figura 17.b);

FIGURA 17 – ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA INTERSTICIAL DO SOLO, EQUIPAMENTOS



a) Colocação da amostra no funil de Büchner



b) Sistema de sucção na saída do compressor de ar

- e) equipamento para determinação do limite de liquidez, com as características indicadas na NBR 6459;
- f) papel filtro: deve ser utilizado um papel filtro adequado para o material a ser ensaiado, tanto no que se refere a granulometria, como no que diz respeito a resistência para permitir as manipulações do ensaio. Foi utilizado um papel filtro

quantitativo 389 faixa azul, com bons resultados em ambos os materiais, argiloso e arenoso;

- g) água destilada;
- h) ácido nítrico;
- i) material para determinação de pH, podendo ser com o papel de tornassol ou com o aparelho eletrônico próprio
- j) espátula, recipiente plástico para a água extraída e outros materiais usuais de laboratório.

Na norma estão descritos apenas os equipamentos e materiais para a extração da água intersticial, e não o equipamento destinado à análise química propriamente dita. Apenas nas etapas do ensaio a norma refere-se ao método de análise química da água.

- Instruções ou Procedimentos

*Preparação da amostra:*

Utiliza-se uma quantidade suficiente de amostra, que permita a extração da água necessária. Ao material deve ser acrescentada água destilada, se necessário, para que a umidade fique próxima da correspondente ao seu limite de liquidez. Para verificar essa condição, utilizam-se os procedimentos descritos na NBR 6459. As bordas inferiores da ranhura aberta no solo devem se unir ao longo de 13 mm de comprimento, com número de golpes do aparelho de Casagrande entre 23 e 28. Caso isso não ocorra, adiciona-se água destilada ou seca-se a amostra, conforme o material esteja abaixo ou acima do limite de liquidez, respectivamente. Repete-se o procedimento descrito até ser atingida a condição citada, deixando-se a amostra em repouso por um dia, em um saco plástico vedado para permitir o equilíbrio e homogeneização da umidade.

A fotografia (Figura 18.a) ilustra a montagem do equipamento no kitassato, feita para a extração da água intersticial. Com auxílio da espátula espalha-se a amostra sobre o papel-filtro posicionado no interior do funil de Büchner, pressionando-a levemente para minimizar a ocorrência de vazios. A espessura da camada deve ser de aproximadamente 2 cm.



FIGURA 18 – ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA INTERSTICIAL DO SOLO, EXTRAÇÃO DE ÁGUA



a) Montagem do equipamento no kitassato



b) Solo sendo revolvido no funil de Büchner

#### *Extração de água:*

Aplica-se o vácuo e revolve-se o material, cuidadosamente para não danificar o papel-filtro, a pequenos intervalos de tempo (Figura 18.b). Com esse procedimento evita-se a formação de um estrato ressecado no contato com o papel-filtro. No solo argiloso o solo era revolvido a cada duas horas.

Se necessário, repetem-se as operações até obter-se o volume necessário de água intersticial. A água deve ir sendo guardada no recipiente plástico vedado, acrescentando-se ácido nítrico à solução se necessário, de forma que o pH permaneça sempre menor que 1.

Para a extração de água intersticial varia muito o tempo empregado e a quantidade de amostra necessária. Dependem do tipo de solo e sua umidade, bem como do método de análise química da água a ser utilizado. Para cada método e equipamento o volume de água intersticial necessário pode diferir. Nos ensaios realizados foi necessário em torno de 50 ml para a absorção atômica, 70 ml para a cromatografia

iônica e 50 ml para a combinação de titulação e fotometria de chama. Para o solo argiloso, de baixa permeabilidade, a extração de aproximadamente 170 ml de água necessários para os três métodos pretendidos exigiu várias semanas de trabalho, mostrando-se inviável para aplicações práticas rotineiras. No solo arenoso ensaiado a extração foi rápida e eficiente. Como a água foi analisada apenas por um método, combinação de titulação e fotometria de chama, os 50 ml de água necessários foram obtidos em um dia de trabalho. Algumas dificuldades foram observadas, porém pelo motivo inverso, isto é, permeabilidade elevada. Para a sucção atuar com eficiência, foi necessário vedar a parte superior do funil com filme plástico transparente.

#### *Ensaio:*

A água intersticial extraída deve ser submetida à análise química, de preferência por absorção atômica segundo a NBR 13603. Determina-se a quantidade de cátions de cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K) presentes na solução. Conforme citado, foram realizadas análises químicas da água extraída da amostra de argila por três métodos distintos, apenas a título de pesquisa e comparação de resultados:

- espectrofotometria de absorção atômica (Figura 19.a);
- cromatografia iônica (Figura 19.b);
- titulação para o cálcio e o magnésio (Figura 19.c), combinada com fotometria de chama para o sódio e o potássio (Figura 19.d).

Esta última alternativa é constituída por métodos mais tradicionais e, supostamente, menos precisos. Porém são mais simples, de menor custo e, provavelmente, disponíveis com maior frequência nos laboratórios. Constam de relatos mais antigos (SILVEIRA et al., 1974). A norma brasileira não apresenta alternativas, apenas recomenda que o método utilizado seja indicado no relatório, caso não tenha sido a espectrofotometria de absorção atômica. Como reagente para a titulação foi utilizado sal di-sódio do ácido etileno-dinitrilo-tetra-acético-di-hidrato (EDTA-Na), padronizado com cloreto de cálcio  $\text{CaCl}_2$ .

FIGURA 19 – ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA INTERSTICIAL DO SOLO, MÉTODOS



a) Espectrofotômetro de absorção atômica



b) Cromatógrafo de alta eficiência



c) Fotocolorímetro para titulação complexométrica



d) Fotômetro de chama

*Cálculos:*

Calcula-se a quantidade total de sais dissolvidos (TSD), através da equação:

$$\text{TSD} = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K} \quad (9)$$

onde Ca, Mg, Na e K representam as quantidades dos cátions de cálcio, magnésio, sódio e potássio, em miliequivalente por litro (meq/litro). A relação entre as unidades adotadas na norma brasileira e as unidades do SI é: 10 meq/litro correspondem a 1 cmol<sub>e</sub>/litro.

Determina-se a percentagem de sódio, através da equação:

$$\text{Porcentagem de sódio (\%)} = (\text{Na/TSD}) \times 100 \quad (10)$$

Finalmente, calcula-se a razão de absorção do sódio (RAS):

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\left(\frac{Ca + Mg}{2}\right)}} \quad (11)$$

A norma brasileira determina como devem ser apresentados os resultados: TSD em meq/litro com três algarismos significativos, percentagem de sódio com aproximação de 0,1% e RAS com três algarismos significativos.

- Pontos de Verificação

A lavagem da vidraria utilizada deve ser feita com água ácida, constituída por uma solução de HCl diluído em água destilada. Do contrário os resultados podem ficar comprometidos. A amostra não deve ser manipulada diretamente com as mãos. A água extraída deve ir sendo armazenada em recipiente plástico, pois o vidro é inadequado.

A concentração do reagente utilizado na titulação complexométrica, deve ser compatível com os baixos teores de cátions normalmente observados na água intersticial.

- Causas Prováveis de Erros

A maior dificuldade observada foi evitar danificar o papel filtro, ao revolver o solo contido no funil de Büchner durante a extração de água. O papel filtro danificado pode permitir a passagem de partículas finas de solo com a água. Se isso ocorrer, para evitar dano à solução já extraída no tubo de ensaio, nova filtragem com papel filtro deverá ser feita. Além disso, convém ir transferindo a água já extraída, do tubo de ensaio para o recipiente plástico vedado.

- Responsabilidades



Trata-se de um ensaio multidisciplinar, isto é, que envolve técnicas de diferentes áreas de conhecimento. As etapas de preparação da amostra e de extração da água intersticial exigem treinamento em laboratório de geotecnia. A etapa de análise química exige um treinamento específico em laboratório químico e no método a ser utilizado. O ideal é o envolvimento de técnicos das duas áreas, ou estagiários com treinamento específico e supervisão de técnicos. A verificação também deve, de preferência, ser feita por técnicos das duas áreas. A aprovação final deve ser de responsabilidade de engenheiro ou pesquisador da área que solicita o ensaio e utiliza seus resultados, que é a geotecnia.

- Anexos

A planilha do ensaio está apresentada ao final (Anexo 1).

#### 6.2.5 Ensaio de Desagregação (“*Slaking Test*”)

- Objetivo e Aplicabilidade

O objetivo do procedimento é a verificação da estabilidade à desagregação de uma amostra de solo cúbica, quando imersa em água (BASTOS, 1999). No procedimento mais freqüentemente utilizado, essa imersão da amostra é gradual, com observações e registro do comportamento do solo a cada etapa.

Segundo Mitchell (1993), o fenômeno do “*slaking*” pode ser associado a muitos solos de partículas finas, quando submetidos à imersão em água na condição não confinada, após sua exposição ao ar. O solo, inicialmente intacto e íntegro, desintegra-se em pequenas partículas.

A desagregação superficial ou empastilhamento, é um fenômeno associado com a ciclagem, alternância de umedecimento e secagem. Ocorre em solos que apresentam argilominerais expansivos, tais como as esmectitas (INFANTI e FORNASARI, 1998).

Segundo Rodrigues e Lopes (1998), o processo é favorecido pela laminação natural freqüente nos materiais sedimentares. As pastilhas que se desprendem do maciço acumulam-se na base de taludes. Os autores denominam o fenômeno de erosão seca pois, em alguns casos, o desprendimento das pastilhas pode ocorrer sem influência

decisiva da água de escoamento superficial ou de contribuição subsuperficial. O processo ocorre na parte mais superficial de taludes e renova-se continuamente, pois os deslizamentos dos fragmentos deixam exposta nova superfície. Pode provocar escorregamentos de taludes ou quedas de blocos.

Em alguns relatos (BRASIL, 1979) o ensaio de desagregação tem sido indicado como critério qualitativo na investigação da erodibilidade de solos. Em outros (Fonseca, 1981, citado por BASTOS, 1999), propõe-se o uso da velocidade de desagregação como um índice classificatório para a erodibilidade de solos superficiais em taludes. Porém, como é difícil estabelecer o momento de ocorrência da desagregação (LEMOS, 2002), o ensaio tem sido mais utilizado para avaliações qualitativas e investigação preliminar, isto é, para indicar riscos e a necessidade de outros métodos de ensaio.

Bastos (1999) considera o ensaio de desagregação como uma evolução do ensaio de torrão. Apesar de ser mais demorado e trabalhoso, apresenta parte de suas vantagens (ver item 6.2.1). Entre elas destacam-se a simplicidade e baixo custo, pois não exige equipamentos, exceto materiais usuais para a moldagem dos corpos de prova. Permite pesquisas e simulações, tanto no que se refere à erodibilidade do solo, como na erosividade do líquido. Graças às dimensões maiores do corpo de prova, permite melhores simulações de condições naturais do que o ensaio de torrão. Trata-se de considerar o efeito de escala, de grande importância para o estudo de solos heterogêneos. É o caso da argila rija da Formação Guabirotuba, que apresenta descontinuidades, resultado de um sistema de fraturas e superfícies polidas, que influem de maneira significativa em seu comportamento (KORMANN, 2002; BOSZCZOWSKI, 2001; KORMANN, 1999; KORMANN et al., 1999b). Além disso, seus resultados são mais completos que o ensaio de torrão, pois envolvem a caracterização de um número maior de processos que podem afetar a erodibilidade dos solos.

Na apresentação e discussão dos ensaios realizados (ver Capítulo 7), é possível ter uma idéia da potencialidade do ensaio de desagregação como ferramenta de pesquisa e simulação.

- Normas e Documentos Complementares

*Normas:*

Não foi encontrada referência de existência de norma para o ensaio de desagregação.

- ABNT – NBR 7182/1986 Solo – Ensaio de compactação – Método de ensaio.

*Documentos complementares*

- (BASTOS, 1999);
- (FONSECA e FERREIRA, 1981);
- (SANTOS, 1997);
- (ARAÚJO, 2000).

- Definições

Desagregação é o processo de ruína de uma amostra de solo não confinada, exposta ao ar e na seqüência imersa em água, segundo Bastos (1999), citando Moriwaki e Mitchell (1977).

Mitchell (1993) identifica diferentes formas de uma porção intacta de solo desintegrar-se numa pilha de pequenas partículas: dispersão, inchamento, desagregação superficial e desagregação interna.

Infanti e Fornasari (1998) associam "slaking" ao empastilhamento, fenômeno que envolve a alternância do umedecimento e secagem (ciclagem), que pode provocar fendilhamento em grande escala e a desintegração da rocha em plaquetas e pastilhas. O processo envolvido é a hidratação de minerais expansivos. Destacam que o fenômeno, por atuar na superfície, tende à auto-estabilização, pois a camada de rocha desagregada protege o material subjacente da variação termo-higrométrica, até ser removida por erosão, fluxo de água, etc.

- Amostra

As considerações sobre a amostra são similares às do ensaio de torrão (ver item 6.2.1.), devido às semelhanças entre os dois ensaios.

Geralmente, o ensaio de desagregação é realizado em amostra de solo indeformada e com sua umidade natural preservada. Suas dimensões devem permitir a talhagem de corpos de prova cúbicos, com lados de aproximadamente 6 cm. É recomendável a repetição do ensaio em três corpos de prova por amostra.

Podem ser utilizadas amostras remoldadas, compactadas de forma semelhante ao procedimento descrito na NBR 7182, da ABNT, buscando uma aproximação das condições que poderão ocorrer no aterro. O material pode, por exemplo, ser compactado no molde cilíndrico do ensaio de compactação e, posteriormente, extraído e talhado na forma cúbica. Pode ainda ser ensaiado na forma cilíndrica.

A argila foi ensaiada como amostra indeformada, e o solo arenoso como amostra compactada em torno da umidade ótima e densidade seca máxima, conforme descrição nos ensaios anteriores.

- Equipamentos e Materiais Utilizados:

- a) bandeja ou outro recipiente com altura tal que o corpo-de-prova sobre a pedra porosa fique totalmente submerso;
- b) pedra porosa para cada corpo de prova, com dimensões adequadas para apoiar toda a sua base;
- c) água destilada;
- d) materiais e equipamentos para compactação de solos, conforme previsto na NBR 7182, caso sejam utilizadas amostras deformadas compactadas;
- e) demais materiais usuais de laboratório, como paquímetro, película transparente de PVC, cronômetro, estufa, ferramentas para talhagem, cápsulas, provetas, papel-filtro e régua graduada.

- Instruções ou Procedimentos

*Preparação da amostra:*

Verifica-se com auxílio do paquímetro, cada uma das dimensões dos corpos de prova, através de médias entre medidas realizadas em diversos pontos.

Do material restante da talhagem ou da compactação de cada corpo de prova, retiram-se amostras do solo para determinação de sua umidade em estufa.

Da argila foram talhados quatro corpos de prova, com forma aproximada de cubos com 6 cm de lado. Três foram mantidos na umidade natural, envoltos em filme transparente de PVC, sendo retirados da câmara úmida apenas no momento do ensaio. O outro foi deixado exposto ao ar, durante aproximadamente 15 dias antes do ensaio.

Aparas deixadas para ressecar juntamente com o corpo de prova, serviram para determinar a umidade do solo ressecado.

Do cilindro compactado do solo arenoso foram talhados dois cubos, sendo um mantido com a umidade de compactação e o outro deixado ressecar ao ar.

Para atender a recomendação de três repetições para cada estudo, teria sido necessário ensaiar maior quantidade de cubos. Tendo em vista que o objetivo principal do estudo era testar a metodologia, não houve maior preocupação com este aspecto.

*Procedimentos relatados em outras pesquisas:*

Por se tratar de ensaio não normatizado, foram pesquisados relatos disponíveis na literatura técnica. Os procedimentos adotados variam, conforme os exemplos citados a seguir.

Em BRASIL (1979) e Fonseca e Ferreira (1981), as amostras cúbicas com 6 cm de lado, indeformadas e na umidade natural, foram submersas em água a 1/3 de sua altura. Nessa condição foram registrados os tempos necessários para uma dada ascensão capilar, para o aparecimento das primeiras fissuras, bem como para a desagregação parcial e total.

Santos (1997), adota dois procedimentos distintos para o ensaio de desagregação, por saturação lenta e gradual e por inundação total e instantânea. Na primeira bandeja os cubos com 6 cm de lado são submetidos à imersão total desde o início do ensaio, prosseguindo sob esta condição até o final do ensaio, após 24 horas. Na segunda bandeja, amostras com as mesmas características são colocadas sobre pedras porosas e sua imersão é feita em quatro etapas:

- água destilada na base das amostras durante 30 minutos;
- água destilada a 1/3 e 2/3 da altura das amostras em dois períodos de 15 minutos;
- submersão total das amostras, mantida até completar 24 horas de ensaio.

O autor adota o critério de Holmgren e Flanagan (1977, citado em SANTOS, 1997) para classificar a reação do solo à inundação, que pode ser assim resumido: sem resposta, abatimento ou desintegração, fraturamento ou expansão, dispersão ou nuvem coloidal.

Utilizando amostras cilíndricas indeformadas com diâmetro de 9,76 cm e altura de 5 cm, coletadas com auxílio de anéis biselados de PVC, Bastos (1999) ensaiou as amostras em duas condições de umidade, secas ao ar por um período mínimo de 72 horas e na umidade natural. Após a extração cuidadosa dos anéis, as amostras foram dispostas sobre uma superfície porosa e submetidas a procedimento de saturação lenta e gradual em quatro etapas, de maneira idêntica a adotada por Santos (1997). Em cada etapa observou o caráter, a intensidade e a velocidade dos processos atuantes, envolvendo umedecimento, expansão, abatimento, fraturamento, ruptura e dispersão, entre outros.

Silva e Lacerda (2001), adotaram o procedimento de saturação lenta em quatro etapas descrito por Santos (1997), inclusive no que diz respeito ao critério de classificação da reação. Ensaíram corpos de prova cúbicos de 6 cm de lado, aparentemente na umidade natural.

#### *Ensaaios realizados:*

Nos ensaios foi inicialmente adotado esse mesmo procedimento de imersão lenta e gradual. Porém, as observações realizadas no decorrer dos mesmos permitiram visualizar uma aplicação interessante para pesquisas. Trata-se de tentar reproduzir e simular em laboratório processos naturais que influem diretamente na erosão, aproveitando as vantagens do ensaio relacionadas ao efeito de escala e à possibilidade de estudar o mesmo solo em diferentes condições.

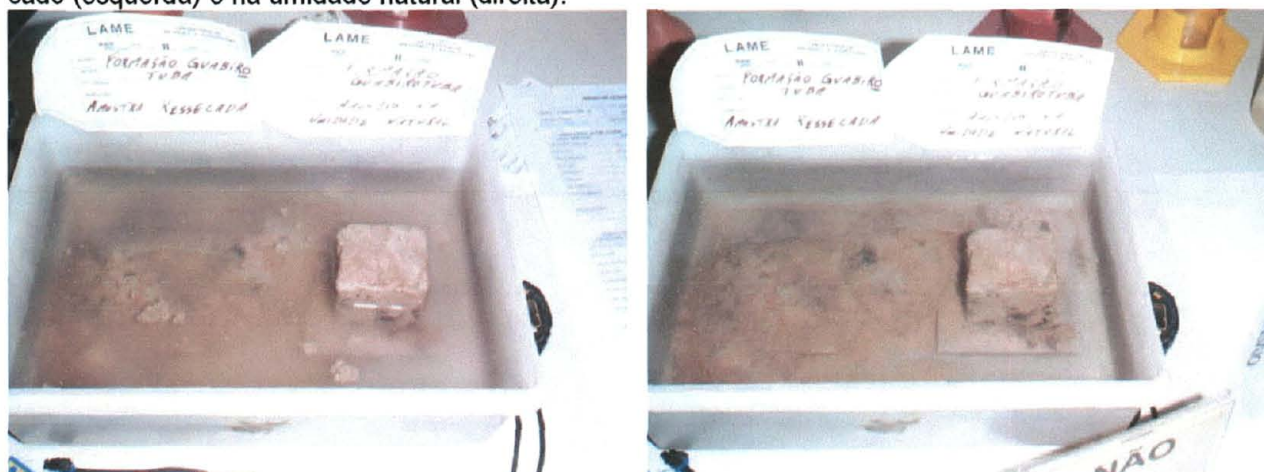
Dois corpos de prova cúbicos da argila indeformada, sendo um na umidade natural e o outro ressecado ao ar, foram simultaneamente submetidos ao ensaio no mesmo recipiente. Assim pode ser avaliado o efeito do ressecamento, comparando-se o comportamento do solo sob as mesmas condições de ensaio (Figura 20). Cada corpo de prova foi apoiado sobre uma pedra porosa recoberta por papel filtro, dentro do mesmo reservatório plástico. Adotou-se a submersão gradual dos corpos de prova em água, seguindo-se as quatro etapas da metodologia de Santos (1997). As observações realizadas ao longo do ensaio para sua avaliação, também foram as recomendadas pelo mesmo autor.

FIGURA 20 – ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO COMPARANDO A ARGILA RESSECADA E NA UMIDADE NATURAL



a) Início do ensaio, com um corpo de prova ressecado (esquerda) e na umidade natural (direita).

b) Água a um terço da altura dos corpos de prova



c) Água a dois terços da altura do corpo de prova

d) Corpo de prova todo imerso a 24 horas de ensaio

O mesmo procedimento foi adotado nos ensaios com a amostra de solo arenoso. Foram ensaiados e comparados dois corpos de prova, sendo um na umidade de compactação e o outro ressecado ao ar (Figura 21).



**FIGURA 21 – ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO COMPARANDO O SOLO ARENOSO NA UMIDADE ÓTIMA E RESSECADA**



**a) Corpo de prova ressecado (esquerda) e na umidade ótima (direita), antes do ensaio**



**b) Água na base no início do ensaio**



**c) Água a um terço da altura dos corpos de prova**



**d) Água a dois terços da altura dos corpos de prova**



**e) Corpos de prova totalmente submersos**



**f) Após 24 horas de ensaio, corpo de prova ressecado desagregado e na umidade ótima parcialmente íntegro**

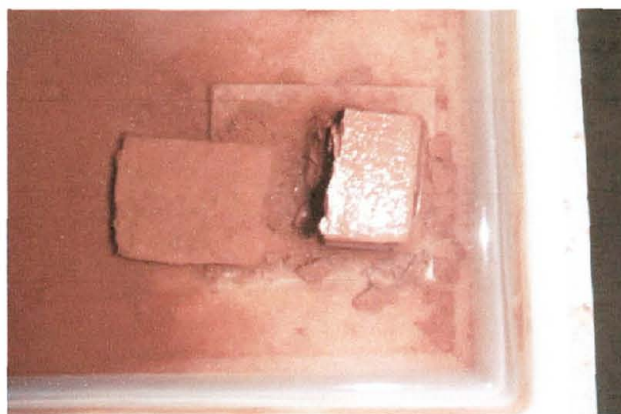


Ao final das 24 horas de submersão, o corpo de prova que se encontrava na umidade ótima de compactação no início do ensaio, ainda estava suficientemente íntegro para prosseguir a observação de seu comportamento. Foi então mantido submerso por vários dias, sendo em seguida submetido a ciclos de ressecamento ao ar e submersão, alternadamente. Ao final do período de submersão, a água do reservatório foi cuidadosamente esgotada. Após o período de ressecamento, o corpo de prova foi submerso até o topo, seguindo as etapas anteriormente descritas (Figura 22).

FIGURA 22 –ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO DO SOLO ARENOSO, COM CICLOS DE RESSECAMENTO E SUBMERSÃO



a) Corpo de prova com umidade inicial ótima, após 24 horas de ensaio, início da ciclagem (2ª parte)



b) Corpo de prova com água a um terço da altura, na 2ª parte do ensaio, após sua ruptura

Constatada a possibilidade de utilizar o ensaio para simular processos complexos como os ciclos de variação de umidade que ocorrem na natureza, importantes para avaliar e compreender o comportamento de certos solos, foram realizados ensaios prolongados também com a amostra indeformada de argila.

Dois cubos talhados, mantidos na umidade natural até o início do ensaio, foram submetidos a um ensaio com vários dias de duração. Nas primeiras 24 horas foi feita a submersão em quatro etapas (Figuras 23.a até 23.d). Em seguida, foram realizados ciclos de ressecamento ao ar (Figura 23.e) e submersão em água (Figuras 23.f até 23.h), da mesma maneira já descrita para o solo arenoso.



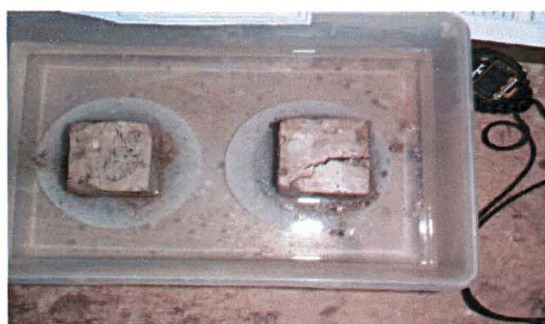
**FIGURA 23 – ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO COM ARGILA NA UMIDADE NATURAL**



**a) Início 1ª parte, com água na base**



**b) Água a 1/3 da altura dos corpos de prova**



**c) Água a 2/3 da altura dos corpos de prova**



**d) Corpos de prova submersos, final da 1ª parte**



**e) Ciclo de ressecamento intermediário**



**f) Água na base no início da submersão da 2ª parte**



**g) Água a 2/3 da altura, na 2ª parte do ensaio**



**h) Água cobrindo os corpos de prova, final do ensaio**

### *Cálculos e resultados:*

Neste ensaio não há cálculos a realizar, apenas observações do comportamento dos corpos de prova e da velocidade de evolução dos processos, de maneira semelhante ao ensaio de torrão.

Foi adotada uma forma usual para descrever os processos observados durante o ensaio (SANTOS, 1997; LEMOS, 2002), bem como a tentativa de obter a velocidade em que ocorrem, resumida a seguir:

- Sem resposta: quando a forma e o tamanho do corpo de prova permanecem iguais ao original;
- Abatimento (*"slumping"*): quando o corpo de prova se desintegra devido a hidratação e desaeração que, ao gerar pressões intersticiais positivas, desagregam o solo transformando-o numa pilha de material desestruturado;
- Fraturamento: quando a concentração dos íons é maior dentro do corpo de prova do que na solução de submersão, a água move-se para o seu interior reduzindo esta concentração e fragmentando-o, principalmente por ação da expansão osmótica, porém mantendo aproximadamente a forma original de suas faces externas;
- Dispersão: quando as paredes do corpo de prova tornam-se difusas com o surgimento de uma "nuvem" coloidal, que cresce a medida que o solo se dissolve e ocorre o processo de dispersão descrito em ensaios anteriores.

- Pontos de Verificação

No caso de ensaios com amostras remoldadas: (ver item 6.2.1).

- Causas Prováveis de Erros

Para alguns tipos solos, bem como para algumas condições do solo a ensaiar, a forma de introduzir o líquido no recipiente contendo o corpo de prova pode influenciar o ensaio. O ensaio propõe a observação do comportamento do solo submetido a submersão lenta e gradual, e não a ação da água em movimento. Da mesma forma que no ensaio de torrão, a agitação do líquido pode falsear resultados, especialmente a observação da formação de nuvem coloidal. A utilização de uma mangueira com sua saída junto ao fundo do recipiente, foi a forma de inserir o líquido que menos problemas causou.

Para a comparação de comportamento de diferentes corpos de prova, a execução dos ensaios simultâneos e no mesmo recipiente elimina diferenças de procedimento, como intervalos de tempo, agitação e características do líquido de imersão. Porém, pode ocorrer o abatimento de um corpo de prova afetando os demais, o que exige uma distância segura entre eles.

Para permitir comparações de comportamento de diferentes solos ou do mesmo solo em diferentes estados, que são as principais finalidades do ensaio, é preciso tomar alguns cuidados com relação a controle e registro de condições ambientais de temperatura e umidade, especialmente no caso de ensaios prolongados como os realizados.

- Responsabilidades

A realização do ensaio é simples, mas exige cuidados para que seus resultados sejam representativos. As etapas de preparação da amostra, execução do ensaio, análise do resultado e sua verificação, devem ser realizados por técnico, ou estagiário supervisionado por técnico, com treinamento em laboratório de geotecnia. A aprovação final deve ser de responsabilidade de engenheiro ou pesquisador da área de geotecnia.

- Anexos

A planilha do ensaio está apresentada ao final (Anexo 1).

#### 6.2.6 Ensaio Inderbitzen

- Objetivo e Aplicabilidade

O objetivo do idealizador do ensaio Inderbitzen era determinar em laboratório a erosão em um talude de aterro, para uma certa condição de chuva e o conseqüente escoamento de água superficial (INDERBITZEN, 1961), permitindo considerar fatores como a compactação relativa do solo, inclinação do “talude experimental”, vazão e duração do escoamento. Cita o autor que o aparelho pode ser modificado, para contemplar também a ação das gotas de chuva na erosão. Tal modificação foi introduzida em alguns estudos (e.g. FREIRE, 2001; LEMOS, 2002).

Apesar de seu objetivo inicial específico, o ensaio Inderbitzen tem sido utilizado para estudar problemas de erosão diversos. O uso freqüente e diversificado do ensaio, com bons resultados relatados, provam que o ensaio é uma ferramenta valiosa. Emprega materiais e equipamentos de baixo custo e fáceis de reproduzir em laboratório. O procedimento de ensaio é relativamente complexo, exigindo planejamento cuidadoso para garantir sua qualidade.

A diversificação e variabilidade possíveis em sua utilização, de grande interesse para novos estudos e pesquisas, aliada a complexidade de um adequado procedimento, dificultam sua padronização. Não se tem notícia de normas para este ensaio, necessidade apontada com freqüência em relatos (FÁCIO, 1991; SANTOS, 1997; LEMOS, 2002). Os procedimentos adotados nos diferentes estudos são variados, embora sejam citados freqüentemente, como referência, o trabalho original sobre o método (INDERBITZEN, 1961), os relatos pioneiros no Brasil (BRASIL, 1979; FONSECA e FERREIRA, 1981) e o trabalho de Fácio (1991). Este último, apresenta uma tentativa de padronização do teste.

Seu procedimento básico consiste em fixar um anel cilíndrico contendo uma amostra do solo a analisar, ao orifício de mesmo diâmetro existente no aparelho, constituído por uma rampa. A superfície da amostra de solo deve coincidir com a face superior do plano inclinado. O escoamento de água na rampa a partir de sua extremidade superior, provoca erosão no solo, que pode ser avaliada através do peso das partículas de solo removidas pela água, retidas em peneira posicionada na extremidade inferior da rampa e submetidas a secagem posterior em estufa. O equipamento permite fixar e repetir a inclinação da rampa e o fluxo de água, cujas características são a vazão, a velocidade e a duração do escoamento. Além disso, devem ser conhecidos o tipo e o estado do solo analisado.

O ensaio não deve ser confundido com um modelo reduzido, pois não há semelhança física entre o processo erosivo que ocorre no talude natural e no aparelho de Inderbitzen. Assim, não há sentido em tentar reproduzir no aparelho a inclinação do talude em estudo, ou associar a intensidade de fluxo no ensaio a uma precipitação pluviométrica determinada, buscando com isto quantificar a erosão que ocorrerá no

talude natural. Mesmo que ao aparelho seja acrescentado um simulador para incluir o efeito do impacto dos pingos de chuva, não há semelhança entre o escoamento da água na rampa e no talude natural. A energia erosiva será diversa em muitos aspectos, como intensidade, incidência, ação, velocidade e, conseqüentemente, trabalho erosivo realizado.

Mesmo não constituindo uma semelhança matematicamente estabelecida, o teste é uma simulação física do processo no sentido experimental. São possíveis simulações envolvendo variações na rampa, no tipo e estado do solo, na energia associada ao fluxo e, até mesmo, no líquido percolante, para análises ambientais com efluentes industriais ou água contaminada por poluentes.

Apesar de seus resultados quantitativos, como o peso de solo seco erodido ou a velocidade de ocorrência da erosão, o teste é predominantemente qualitativo, conforme destacado por seu idealizador (INDERBITZEN, 1961).

O ensaio de Inderbitzen é um teste direto de erosão. De maneira semelhante aos ensaios de torrão e de desagregação anteriormente descritos, existe a possibilidade de estudar “*slaking*”, empastilhamento, expansão, descontinuidades e outros processos e características naturais. São aspectos importantes para alguns estudos de erosão, como no caso da argila rija da Formação Guabirotuba.

Seguindo a mesma idéia originada no ensaio de desagregação, no estudo foram realizados ensaios Inderbitzen prolongados, buscando simular processos complexos que envolvem ciclos de umedecimento e secagem.

O ensaio original (INDERBITZEN, 1961) tem recebido diversas contribuições, no que se refere a equipamentos e procedimentos (BRASIL, 1979; FONSECA e FERREIRA, 1981; FÁCIO, 1991; SANTOS, 1997; FRAGASSI e MARQUES, 2001; LEMOS, 2002), bem como inspirado novos ensaios como o Inderbitzen Modificado (FREIRE, 2001).

- Normas e Documentos Complementares

*Normas:*

Não foi encontrada referência de existência de norma para o ensaio Inderbitzen.

- ABNT – NBR 7182/1986 Solo – Ensaio de compactação – Método de ensaio.

*Documentos complementares:*

- (INDERBITZEN, 1961);
- (BRASIL, 1979);
- (FÁCIO, 1991);
- (FONSECA e FERREIRA, 1981);
- (LE MOS, 2002);
- (SANTOS, 1997);
- (BASTOS, 1999).

- Definições

“Slaking” e empastilhamento: definições (ver item 6.2.5).

- Amostra

Originalmente o ensaio Inderbitzen é realizado em amostra de solo compactada. Suas dimensões devem ser compatíveis com o equipamento Inderbitzen a ser utilizado, especialmente com o orifício existente na rampa para fixação do corpo de prova. As amostras devem ser compactadas no próprio anel do ensaio ou, eventualmente, em outro molde sendo depois transferidas para o anel. Se existirem excessos em relação a altura do anel, o corpo de prova deve ser rasado de modo a resultar com a mesma altura. A compactação pode ser feita conforme as recomendações da NBR 7182.

Podem ser utilizadas amostras indeformadas, coletadas no campo cravando-se o anel do ensaio no terreno em estudo. Caso a amostra tenha sido coletada em outro amostrador ou em bloco indeformado, procede-se em laboratório como no campo, cravando-se o anel do ensaio na amostra indeformada. Rasa-se o corpo de prova de modo a resultar com a mesma altura do anel, e determina-se a densidade e a umidade do material.

No ensaio original (INDERBITZEN, 1961), o anel é de aproximadamente 15,2 cm (6 polegadas) de diâmetro interno e altura. Esse diâmetro assemelha-se ao adotado no ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR), conforme a NBR 7182, e tem sido utilizado em diversos estudos (BRASIL, 1979; FRAGASSI e MARQUES, 2001). Porém, são mais freqüentes os anéis com diâmetro aproximado de 10 cm (FÁCIO, 1991; SANTOS, 1997; FREIRE, 2001; LEMOS, 2002), influenciados pela proposta de

padronização de Fácio (1991) e pelo diâmetro do molde cilíndrico utilizado no ensaio de compactação Proctor normal, conforme a NBR 7182. Bastos (1999) utiliza amostras coletadas em anéis biselados, com diâmetro de 9,76 cm e altura de 5,0 cm.

Para os ensaios com a argila foram utilizadas amostras indeformadas, coletadas nos anéis metálicos do ensaio (Figura 4), com 10,0 cm de diâmetro e 5,3 cm de altura.

A amostra de solo arenoso foi compactada em anel de PVC do ensaio, em torno da umidade ótima e da densidade seca máxima, determinadas previamente em ensaio normal de compactação.

- Equipamentos e Materiais Utilizados:

- a) aparelho Inderbitzen, constituído por:

- chapa ou placa metálica, em PVC rígido, ou em madeira, dotada de uma aba vertical em toda a periferia exceto na extremidade inferior afilada, com possibilidade de fixação do sistema de escoamento de água e com um orifício circular para encaixar o corpo de prova. Foi utilizada uma placa metálica, com 34 cm de largura e 78 cm de comprimento (Figura 24.a);
- estrutura de suporte para fixação da placa, de modo a constituir uma rampa, com possibilidade de variar sua inclinação. No equipamento utilizado, a variação possível é de 10° a 46° (Figura 24.c);
- espargidor para criar um escoamento superficial de água, fixado na extremidade superior da rampa. Foi utilizado um tubo de PVC perfurado (Figura 24.a);
- sistema de fixação do anel e corpo de prova no orifício da rampa, capaz de impedir a infiltração de água através do corpo de prova. Foi utilizada uma placa metálica sob o anel, que permite vedar sua superfície inferior e fixar o anel à superfície inclinada (Figura 24.d);



FIGURA 24 – ENSAIO INDERBITZEN, EQUIPAMENTO



a) Rampa e sistema de escoamento



b) Peneira e recipiente na saída da rampa



c) Rampa, estrutura de suporte e recipiente sob o anel com o corpo de prova



d) Fixação e vedação do anel sob a rampa

- b) anel para conter e fixar o corpo de prova à rampa e que pode servir como amostrador ou como molde. Foram utilizados anéis de ensaio de dois tipos, metálicos para a cravação no terreno e obtenção de amostras indeformadas (Figura 4), e em PVC rígido para compactação de amostras remoldadas;
- c) sistema para alimentar o escoamento superficial de água do aparelho, capaz de manter a vazão constante e controlada. Foi utilizada uma caixa d'água para evitar interrupção de fornecimento durante o ensaio, dotada de um tubo "ladrão" interno para manter a pressão constante, com um conjunto de tubulações e registros para controlar a vazão entre a rede e a caixa, e entre a caixa e a superfície inclinada;

- d) peneiras circulares de malhas quadradas. Foram utilizadas peneiras com abertura de malha de 0,054 mm (Figura 24.b);
- e) recipientes para receber a água e as partículas sólidas finas que passam na peneira, na saída da rampa e sob a peneira. Foram utilizadas cinco caixas em plástico rígido com capacidade para 40 litros, sendo uma para cada etapa adotada no procedimento descrito a seguir (Figura 24.b);
- f) recipiente para receber água e eventualmente partículas sólidas, sob o anel e o corpo de prova, em caso de infiltração de água através do solo (Figura 24.c);
- g) materiais para vedação do corpo de prova, de modo a reduzir e, se possível, evitar passagem de água através do solo. Foi utilizada massa de calafetar para vedar os espaços entre a face inferior do anel e a placa do sistema de fixação, bem como eventuais espaços laterais entre o corpo de prova e a parede interna do anel (Figura 24.d);
- h) materiais e equipamentos para compactação de solos, conforme previsto na NBR 7182, para ensaio com amostra compactada;
- i) demais materiais usuais de laboratório, como película transparente de PVC, cronômetro, balanças, estufa, ferramentas para talhar corpos de prova, bisnaga e cápsulas.

- Instruções ou Procedimentos

*Preparação da amostra:*

Do material restante da preparação de cada corpo de prova retiraram-se amostras do solo, para determinação da umidade em estufa. Os pesos do anel e do corpo de prova foram determinados previamente na balança.

Os primeiros estudos geotécnicos com esse ensaio publicados no Brasil (BRASIL, 1979; FONSECA e FERREIRA, 1981), bem como outros mais recentes (BASTOS, 1999), relatam comparações de resultados de análises com os solos em três diferentes condições de umidade inicial: natural, previamente ressecada em estufa a 50°C durante 12 horas e saturada por embebição durante 24 horas. Alguns autores (FÁCIO, 1991; SANTOS, 1997) recomendam a embebição prévia de todos os corpos de prova para aproximá-los da condição de saturação, visando uniformizar a umidade

inicial da amostra e eliminar a sucção, fator que pode influir de forma determinante no resultado do ensaio.

Quatro corpos de prova da argila indeformada foram deixados expostos ao ar, confinados no anel do ensaio. Ao final de aproximadamente 15 dias, quando foram submetidos ao ensaio Inderbitzen, estavam ressecados e apresentando retração, fissuração e empastilhamento (Figura 25.b). Quatro corpos de prova foram mantidos na umidade natural (Figura 25.a), desde a sua coleta até o momento do ensaio, através de proteção com filme transparente de PVC e manutenção em câmara úmida.

FIGURA 25 – ENSAIO INDERBITZEN, CORPOS DE PROVA



Da amostra de solo arenoso foram compactados quatro corpos de prova, aproximadamente nas condições de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima. Da mesma forma que na argila, a umidade de dois deles foi preservada até o momento do ensaio e, os outros dois foram deixados secar ao ar durante 15 dias.

A variação da umidade inicial dos corpos de prova tem sido utilizada para verificar a influência deste aspecto no comportamento de determinados solos (BASTOS, 1999; BASTOS et al., 2000; ARAUJO, 2000; BASTOS et al., 2001). Foi adotada para confirmar sua importância no caso da argila rijá da Formação Guabirotuba. Esse procedimento demonstra a versatilidade do ensaio Inderbitzen e sua capacidade de simular condições reais de campo e processos naturais importantes para a compreensão do comportamento do solo. A saturação prévia do corpo de prova



para homogeneizar condições de ensaio (FÁCIO, 1991; SANTOS, 1997) é uma forma de buscar a padronização. Porém, elimina um dos fatores a considerar, ao pesquisar o comportamento dos solos diante da erosão. Fácio (1991), citando Nogami (1981), justifica a embebição prévia dos corpos de prova pelo fato do ensaio Inderbitzen não levar em consideração o aspecto da sucção. Afirma o autor que o alívio repentino da sucção com a aplicação de água no início do ensaio, poderia vir a favorecer o processo erosivo e consequentemente os resultados ficariam alterados. Porém, com a saturação elimina-se a possibilidade de compreender e avaliar uma condição desfavorável e provável de ocorrência de erosão no campo. A embebição prévia dificilmente vai conduzir a um estudo “a favor da segurança” (Capítulo 7).

Ao invés de eliminar a sucção é mais conveniente considerá-la, através de sua obtenção e correlação com os resultados dos ensaios Inderbitzen, ou outros como desagregação e torrão. Assim, de cada tipo de solo e condição de umidade a ensaiar, utilizou-se um dos corpos de prova para determinação da umidade em estufa e da sucção pelo método do papel filtro (MARINHO, 1994), indicativas das condições iniciais da amostra no ensaio Inderbitzen.

#### *Procedimentos relatados em outras pesquisas:*

O ensaio Inderbitzen não é normatizado, o que torna interessante comparar os relatos disponíveis na literatura técnica. Observa-se que os procedimentos adotados em trabalhos e pesquisas variam, conforme exemplos citados a seguir.

Fixa-se a placa ou chapa à estrutura, formando uma rampa com a inclinação selecionada para o ensaio. Fácio (1991) propõe a fixação da inclinação, bem como da vazão e da duração do ensaio, através de testes prévios de erosão no aparelho com o solo a ensaiar. Como citado anteriormente, a inclinação do talude estudado não deve ser a referência para a inclinação da rampa, da mesma forma que a vazão e duração do ensaio não tem relação importante com a previsão de chuvas. A vazão e a inclinação da rampa devem permitir boas condições de ensaio e provocar erosão mensurável. A duração deve ser tal que ocorra a tendência à estabilização da erosão. A duração do ensaio deve permitir adaptações, pois se for atingido o tempo previsto e

ainda estiver aumentando a perda de solo ou sua velocidade, o ensaio deve ser prolongado.

Fonseca e Ferreira (1981) realizaram ensaios com rampa de 44° e 59°, com vazões variando entre 59 e 314 ml/s e duração de 2 horas. Fácio (1991) adotou inclinação de 10°, vazão de 50 ml/s e duração de 20 minutos. A redução da vazão está associada a modificações introduzidas pelo autor no equipamento, pois reduziu o diâmetro do corpo de prova e a largura da rampa. Tais alterações simplificam o ensaio, porém podem causar perda de precisão. Segundo Inderbitzen (INDERBITZEN, 1961), quanto maior o corpo de prova, maior a área de solo exposta e, conseqüentemente, maior a acurácia dos resultados do teste. Santos (1997), reduziu ainda mais a largura da rampa, de modo que toda a vazão escoasse sobre a amostra. Adotou vazão de 17,5 ml/s e duração de 30 minutos. Bastos (1999) realizou ensaios com inclinação da rampa de 10°, 26°, 45° e 54°, vazões de 50 e 100 ml/s e duração de 20 minutos. Lemos (2002) utilizou vazões variáveis entre os diversos ensaios, com valores indo desde cerca de 54 ml/s até 152 ml/s. Destaca-se nos relatos citados, a observação de que as perdas de solo mais significativas ocorrem no início do ensaio, especialmente nos 5 minutos iniciais.

Estabelecidos os parâmetros do ensaio, fixa-se o anel com o corpo de prova ao orifício existente no aparelho, de modo que a face superior do solo fique nivelada com a rampa.

Vedam-se os espaços entre o anel e a placa de vedação e sustentação que fica sob a face inferior do corpo de prova (Figura 24.d) e se for o caso, como nos solos ressecados e com retração, os pequenos espaços entre o solo e a parede do anel. Apesar da importância da infiltração na erosão dos solos, sua ocorrência deve ser evitada no ensaio Inderbitzen, pois dificulta o controle, execução e interpretação de resultados. Mesmo que seja trabalhosa e demorada, a cuidadosa operação de vedação é indispensável para garantir a qualidade do ensaio.

Protege-se a superfície do corpo de prova já posicionado para o ensaio, cobrindo toda a rampa com filme transparente de PVC (Figura 26.a), de modo que a água não entre em contato com a amostra na etapa de ajuste e verificação da vazão. Liga-se o

sistema de escoamento de água sobre a rampa, verificando se a vazão mantém-se constante e com a intensidade selecionada para o ensaio. Posiciona-se a peneira na saída de água da rampa, bem como os recipientes sob a peneira (Figura 24.b) e sob o corpo de prova (Figura 24.c). Alguns autores (FONSECA e FERREIRA, 1981; FÁCIO, 1991) adotam um jogo de peneiras, para obtenção da distribuição granulométrica do material erodido.

FIGURA 26 – ENSAIO INDERBITZEN, DETALHES DA EXECUÇÃO



a) Rampa com filme transparente, antes do início



b) Início do ensaio com a retirada do filme de PVC



c) Troca de peneiras durante o ensaio



d) Retirada do material erodido da peneira

Inicia-se o ensaio com a retirada do filme plástico (Figura 26.b) e acionamento simultâneo do cronômetro. Em tempos previamente determinados substitui-se a peneira

(Figura 26.c), transferindo-se seu conteúdo para cápsulas (Figura 26.d). Após secagem em estufa, fornecerão o peso seco do material erodido retido nas peneiras, em cada intervalo de tempo. Bastos (1999) utiliza um recipiente para coleta da água e material erodido e, depois de concluído o ensaio, passa todo seu conteúdo através de um conjunto de peneiras. Prosseguem essas operações até a conclusão do tempo previsto de ensaio.

Concluído o ensaio, desliga-se o sistema de escoamento, determina-se o volume de água coletado durante o ensaio nos reservatórios posicionados após a peneira na saída do escoamento. Transfere-se o material que restou no anel para uma cápsula e para secagem em estufa, obtendo-se o peso e a umidade final da amostra não erodida. Caso ocorra a passagem de partículas muito finas através das peneiras colocadas na saída do escoamento da rampa é necessário, de alguma forma, considerar este material. Santos (1997) calcula a perda de solo ponderada, que é a perda medida no ensaio, corrigida em função da fração maior que a peneira utilizada obtida no ensaio de granulometria. Fácio (1991) avalia por amostragem o peso seco do material que passa na peneira, para acrescentar ao peso seco de material erodido.

#### *Procedimentos adotados:*

Optou-se por fixar o maior número possível de parâmetros de ensaio, variando apenas aqueles que poderiam conduzir ao objetivo principal do estudo, bem como fornecer algumas informações sobre o comportamento da argila rija da Formação Guabirotuba. Foi fixada uma inclinação única da rampa para todos os ensaios, igual a 34° com a horizontal, bem como uma só vazão, em torno de 70,0 a 75,0 ml/s. Foram selecionados através de testes rápidos prévios e assemelham-se a parâmetros de outros estudos já citados. Evitou-se uma inclinação pequena, pois dificultava a uniformização da lâmina d'água. Com vazão muito baixa a erosão pode resultar pouco significativa. Se excessivamente alta, provoca turbulência no início da rampa, no contato com o solo e com os anteparos verticais da periferia, bem como dificulta as operações de coleta e controle do material e da água na saída.



Foi estabelecida a previsão inicial de duração dos ensaios em vinte minutos, com possibilidade de prolongamento quando necessário. Foram programadas quatro trocas de peneiras, a 1 , 5 , 10 e 15 minutos após o início do ensaio.

Estabeleceu-se um procedimento de controle de vazão antes do início e durante o ensaio. Caixas plásticas com capacidade para 40 litros, posicionadas na saída do fluxo, necessárias para a coleta do material que passa na peneira, serviram também para o controle da vazão. Antes do início do ensaio, acionava-se o escoamento d'água sobre a rampa coberta com o filme transparente de PVC e, durante um minuto, captava-se a água na saída com a caixa plástica. Através do peso da caixa com a água, determinava-se a vazão por minuto. Esse procedimento era repetido e associado a regulagens nos registros, até obter-se a vazão pretendida e sua repetição em, pelo menos, três pesagens sucessivas. Iniciado o ensaio, a cada troca de peneira trocava-se igualmente a caixa (Figura 26.b). O material fino que passava na peneira e ficava retido na caixa, era amostrado (FÁCIO,1991). O peso do conteúdo da caixa permitia o cálculo do peso de material que passa na peneira, bem como aferir a vazão em cada intervalo entre troca de peneiras e caixas. As tentativas de estabelecer sistema de controle de vazão com rotâmetro, ou de pressão d'água com manômetro de linha foram abandonadas, pois provocaram quedas significativas de pressão, reduzindo a vazão a níveis insuficientes para o ensaio.

Cuidados especiais foram necessários para permitir a realização de ensaios com argila ressecada, pois a retração do solo (Figura 25.b) abre espaços entre o corpo de prova e o anel que precisam ser pacientemente vedados para evitar infiltração. Vedação foi utilizada na extremidade inferior do corpo de prova, no contato do anel com a placa de sustentação, bem como nos cantos da face superior da amostra (Figura 27.a). Materiais utilizados em outros trabalhos, como silicone e massa de modelar, apresentaram inconvenientes. Foi utilizada massa de calafetar, com bons resultados.

FIGURA 27 – ENSAIO INDERBITZEN EM AMOSTRA DE ARGILA RESSECADA



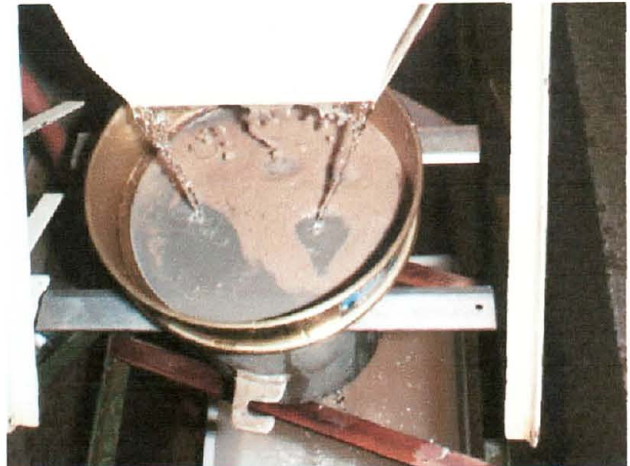
a) Corpo de prova vedado com massa de calafetar, antes do início do ensaio



b) Intensa erosão durante o ensaio



c) Efeito da erosão intensa



d) Grande quantidade de argila erodida coletada

Apesar de todos os cuidados, os ensaios com materiais ressecados não apresentaram a mesma precisão e repetição das condições dos demais. A retração provoca redução do corpo de prova, de difícil avaliação, causando pequenas imprecisões em cálculos posteriores. Além disso, a erosão foi tão intensa e rápida (Figura 27), que o curso d'água sobre o corpo de prova modificava-se ao longo do ensaio, alterando seu padrão de conversão de energia. O fluxo cria sulcos e quedas no corpo de prova. No entanto, nada disso invalidou a realização de tais ensaios. Permitiram identificar e reproduzir processos que ocorrem na natureza e que afetam o comportamento desses solos. Permitiram realizar em laboratório o estudo de erosão na condição mais desfavorável, obtendo-se resultados a favor da segurança.

Aqui também as observações realizadas durante os ensaios conduziram a inovações, permitindo reproduzir e simular em laboratório processos naturais complexos que podem ter influência direta no comportamento dos solos. Como no ensaio de desagregação, foi combinado o procedimento normal com uma espécie de ensaio de ciclagem. A mesma amostra foi submetida ao ensaio duas vezes, intercaladas por um período de secagem ao ar. Um corpo de prova de argila indeformada na umidade natural foi submetido ao ensaio usual com 20 minutos de duração e, após um período de secagem ao ar de 15 dias, foi submetido a novo ensaio de 20 minutos. A secagem intermediária ocorreu com o corpo de prova mantido no aparelho Inderbitzen. Como é impossível pesar o corpo de prova ao final do primeiro ensaio e ao início do segundo, estes pesos precisam ser inferidos dos pesos iniciais e finais do ensaio completo, e dos pesos de material erodido. Cuidados especiais são necessários antes do início do segundo ensaio, para a vedação dos espaços junto ao anel, resultantes da retração do corpo de prova. Tal procedimento aproxima o experimento do processo natural resultante da alternância de períodos secos e úmidos, além de permitir comparar o comportamento do mesmo corpo de prova antes e depois da secagem.

#### *Cálculos e resultados:*

Os resultados do ensaio são apresentados em gráfico “tempo *versus* perda de solo acumulada”. Para cada intervalo de tempo entre medidas calculou-se a perda unitária de solo ou erosão, cujos valores acumulados foram utilizados para o gráfico citado. O cálculo da perda de solo foi feito através da equação (12):

$$PU = \left( \frac{PR + PP}{AA} \right) \quad (12)$$

onde:

PU = perda unitária de solo;

PR = peso do solo seco em estufa retido na peneira no intervalo;

PP = peso calculado de solo que passa na peneira no mesmo intervalo;

AA = área da superfície do corpo de prova exposta à erosão, determinada pela área da secção transversal interna do anel.

O valor do peso de solo que passa na peneira (PP), foi determinado por amostragem com um béquer, na caixa que continha a água do escoamento de cada intervalo (FÁCIO, 1991). Agitando o conteúdo do recipiente colocado após a peneira na saída do escoamento, de modo que o material fino ficasse em suspensão, coletava-se uma amostra da suspensão em um béquer. Após secagem em estufa e pesagem do material sólido contido no béquer, o peso total estimado de material seco passando na peneira, era determinado através da equação (13):

$$PP = \left( \frac{V_1 \times PB}{V_2} \right) \quad (13)$$

onde:

PP = peso calculado de solo que passa na peneira no intervalo;

$V_1$  = volume total de água coletado na caixa durante o mesmo intervalo;

PB = peso do solo existente no béquer após secagem em estufa;

$V_2$  = volume de água coletado no béquer.

Alguns relatos (FONSECA e FERREIRA, 1981; LEMOS, 2002) apresentam também gráficos “tempo *versus* velocidade de erosão”. A relação entre a perda unitária de solo ocorrida em cada intervalo de tempo e o tempo decorrido no intervalo, fornece a velocidade de erosão.

Para melhor caracterizar o ensaio, as umidades inicial e final da amostra foram determinadas com auxílio da estufa e indicadas nos resultados.

- Pontos de Verificação

Procedimentos adotados na preparação de amostras remoldadas : (ver item 6.2.1).

A qualidade do ensaio é afetada por oscilações de vazão, quando o sistema de escoamento de água é conectado diretamente na rede. Normalmente essa é a condição de ensaio, devido ao grande volume de água necessário. O sistema ou o procedimento de ensaio deve incluir alguma forma de verificação e controle, para permitir a correta interpretação dos resultados.

É conveniente prever o controle da qualidade da água da rede através do pH (SHERARD et al., 1976b). Seu valor deve ser registrado, pois sua variação pode ser a causa de resultados duvidosos.

- Causas Prováveis de Erros

O aspecto já citado, da qualidade e quantidade (vazão) de água, pode causar erros de ensaio e de avaliação de seus resultados.

Os cuidados descritos para garantir a vedação e impedir, ou ao menos reduzir significativamente, a infiltração de água através do corpo de prova, são importantes para evitar incertezas e erros.

Para permitir análises e comparações de comportamento de diferentes solos, ou do mesmo solo em diferentes estados, é necessário o controle e registro de condições ambientais de temperatura e umidade, especialmente no caso de ensaios prolongados como os realizados.

- Responsabilidades

A preparação e o procedimento do ensaio não são simples, exigindo planejamento e cuidados para garantir a qualidade dos seus resultados. As etapas de preparação da amostra, execução do ensaio, análise do resultado e sua verificação, devem ser realizados por técnico, ou estagiário supervisionado por técnico, com treinamento em laboratório de geotecnia. A aprovação final deve ser de responsabilidade de engenheiro ou pesquisador da área de geotecnia.

- Anexos

A planilha do ensaio está apresentada ao final (Anexo 1).

## 6.2.7 Ensaio Inderbitzen Modificado (GES)

- Objetivo e Aplicabilidade

Como uma adaptação do ensaio Inderbitzen, Freire (2001) propõe um novo ensaio, denominado Inderbitzen Modificado ou Grau de Erodibilidade do Solo (GES). Segundo seu idealizador o objetivo principal é reproduzir, em amostras indeformadas de solo, as condições de campo de erosão durante precipitações atmosféricas, envolvendo a

seqüência natural de desagregação pelo impacto da gota, seguida de escoamento superficial da água de chuva.

O impacto das gotas de chuva tem grande importância na erosão do solo, conforme citado anteriormente. O ensaio Inderbitzen não contempla este efeito, simulando apenas a ação erosiva das enxurradas superficiais. Por esse motivo, o autor do ensaio (INDERBITZEN, 1961) indica a possibilidade de adicionar a simulação do efeito das gotas de chuva, através de chuveiro ou de “*sprinkler*”.

Simuladores de chuva tem sido utilizados em estudos de erosão hídrica pluvial, tanto em experimentos de campo, como em testes de laboratório. No campo substituem a incerteza da espera por chuvas naturais, permitindo controlar as características da precipitação simulada, tais como intensidade, duração, quantidade e frequência (GUERRA, 1999). Em comparação com pesquisas que dependem de chuvas naturais, o uso de simuladores de chuva conduz a resultados mais rápidos e eficientes, devido ao controle (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985). Frequentemente são utilizados em experimentos, em parcelas ou talhões equipados com coletores de solo e de água.

Alguns estudos de erosão de solos em laboratório incluem a utilização de simuladores de chuva, como o de Lemos (2002) que, com tal equipamento, busca a associação da ação do impacto das gotas com a do escoamento superficial do ensaio Inderbitzen. Há também ensaios desenvolvidos especificamente para avaliar a resistência dos agregados ao impacto da gota (ANGULO, 1983).

O Inderbitzen Modificado busca conciliar as vantagens do ensaio Inderbitzen nos estudos de erosão por escoamento superficial, com os simuladores de chuva para considerar a contribuição do impacto das gotas. Inicialmente proposto para amostras indeformadas (FREIRE, 2001), o método é posteriormente (FREIRE e GALVÃO, 2002) estendido também para amostras compactadas de solos.

O ensaio Inderbitzen Modificado consiste, basicamente, em uma grelha apoiada sobre uma estrutura metálica tubular, de forma a constituir uma rampa. A amostra de solo colocada sobre a grelha simula, de certa forma, um talude. Dois tubos de PVC perfurados segundo uma linha longitudinal, fixados horizontalmente acima da rampa, conectados a um sistema de alimentação e controle de vazão, provocam um

“chuveiramento” de água sobre a amostra. A amostra de solo é exposta ao impacto das gotas e, de maneira semelhante ao talude natural, a água que não se infiltra na amostra escoar superficialmente, completando a simulação dos agentes erosivos.

Da mesma forma que o ensaio Inderbitzen, o Inderbitzen Modificado não pode ser considerado como um modelo reduzido do talude, pois não há semelhança física com o processo erosivo natural. Os fatores que afetam a energia erosiva ao longo do processo, como a altura de queda das gotas, sua incidência, frequência e distribuição, o comprimento e a inclinação do talude, características da água, entre outros, não guardam relações de semelhança e de escala, entre a natureza e o teste em laboratório. Não há sentido em se tentar reproduzir no aparelho a inclinação do talude em estudo, ou a intensidade de fluxo associada a uma precipitação pluviométrica determinada, buscando quantificar a erosão que ocorrerá no talude natural. A energia erosiva é diferente e, conseqüentemente, também deverá ser o trabalho por ela realizado.

Mesmo não havendo semelhança física, o teste permite adequada avaliação experimental do processo erosivo. São possíveis as mesmas simulações descritas no ensaio Inderbitzen, envolvendo variações da rampa, tipo e estado inicial do solo, e energia associada ao escoamento e queda de gotas, através da vazão e duração do ensaio.

O “chuveiramento” do teste apresenta algumas desvantagens em relação aos simuladores de chuva freqüentemente utilizados (LEMOS, 2002). Nos arranjos convencionais a altura de queda das gotas é mais representativa de condições naturais. A ação das gotas é mais distribuída na amostra buscando-se, inclusive, provocar quedas em posições aleatórias e variadas. No Inderbitzen Modificado é bastante reduzida a altura de queda das gotas utilizada, de 20 centímetros em média, com energia potencial inferior a das chuvas. Os fluxos provenientes das perfurações nos tubos de PVC, incidem e afetam o solo de forma localizada, concentrada, contínua e, conseqüentemente, diversa das precipitações naturais. Seu autor, em recente comunicação pessoal, relatou modificações que estão sendo introduzidas no ensaio, buscando atenuar algumas dessas diferenças.



Apesar dos resultados quantitativos, o teste tem caráter predominantemente qualitativo e comparativo (FREIRE, 2001; FREIRE e GALVÃO, 2002).

Por agregar e ampliar os aspectos positivos do ensaio Inderbitzen, a idéia do ensaio Inderbitzen Modificado é boa. Permite uma avaliação direta da erosão, além de comparações e simulações. Exige novos estudos e desenvolvimento, mas pode ser uma útil ferramenta em pesquisas e serviços. De maneira semelhante a ensaios anteriormente descritos, permite reproduzir aspectos importantes para estudos de erosão em alguns solos. No caso da argila rija da Formação Guabirotuba, podem ser analisados aspectos como empastilhamento, desagregação, expansão e descontinuidades. Emprega materiais usualmente disponíveis em laboratórios, além de equipamentos de baixo custo e fáceis de reproduzir.

O Inderbitzen Modificado apresenta algumas vantagens em relação ao ensaio Inderbitzen. Bastos (1999), citando Nogami (1981), aponta como crítica ao ensaio Inderbitzen o impedimento da infiltração que, em solo de elevada infiltrabilidade, pode resultar em erosão mais acentuada no laboratório do que a real no campo. Outra limitação apontada ao ensaio Inderbitzen diz respeito a perturbação do fluxo, gerada na descontinuidade entre amostra e rampa junto a periferia do corpo de prova. Ambas as limitações não ocorrem no ensaio Inderbitzen Modificado.

Os procedimentos e a preparação requeridos para o ensaio são relativamente complexos, exigindo planejamento cuidadoso para garantir sua qualidade. A inexistência de norma, a carência de relatos anteriores detalhados e a necessidade de desenvolvimento, tornaram obrigatórias adaptações e elaboração de procedimento.

- Normas e Documentos Complementares

*Normas:*

Não existe norma para o ensaio Inderbitzen Modificado.

- ABNT – NBR 7182/1986 Solo – Ensaio de compactação – Método de ensaio.

*Documentos complementares:*

- (FREIRE, 2001);

- (FREIRE e GALVÃO, 2002).

- Definições

“*Slaking*” e empastilhamento: (ver item 6.2.6).

- Amostra

O ensaio Inderbitzen Modificado pode ser realizado em amostra de solo indeformada, ou em amostra compactada. As dimensões da amostra devem ser compatíveis com o equipamento a ser utilizado, principalmente com a área atingida pelo escoamento de água (“chuveiramento”).

A melhor amostra para que sejam atingidos os objetivos do ensaio, é um bloco indeformado com grande superfície exposta à ação da água. A superfície superior da amostra, que recebe diretamente o impacto da água, deve, tanto quanto possível, ser plana. Para realizar ensaios com o solo nas condições naturais, são necessários cuidados especiais, já citados em ensaios anteriores, relacionados com a coleta, transporte e armazenamento da amostra.

No caso de amostras compactadas, pode ser utilizado o equipamento previsto na NBR 7182, sendo o molde cilíndrico grande (CBR) o mais apropriado.

- Equipamentos e Materiais Utilizados:

a) aparelho Inderbitzen Modificado, constituído por:

- estrutura tubular metálica ou em PVC rígido, para suporte e fixação da grelha, de modo a constituir uma superfície inclinada. Foi utilizada a rampa e a estrutura do aparelho Inderbitzen, com o orifício para encaixe da amostra devidamente vedado com filme transparente de PVC;
- grelha metálica para colocação do corpo de prova. Foi utilizada uma grade metálica (Figura 28), dobrada nas duas laterais no sentido longitudinal, de modo a constituir dois apoios e a fixação na rampa do aparelho de Inderbitzen;
- sistema de “chuveiramento” constituído por dois tubos de PVC, ligados ao sistema de alimentação de água numa extremidade e obturados na outra, posicionados paralelamente entre si e na horizontal, a uma altura de cerca de 20 cm do centro do corpo de prova, cada um com uma linha de furos disposta para baixo. Os tubos utilizados foram de 25 mm de diâmetro, 330 mm de

comprimento, com perfurações circulares de aproximadamente 2 mm de diâmetro, espaçados entre si de cerca de 26 mm (Figura 28.b);

- apoio para o corpo de prova, para impedir seu escorregamento sobre a grelha inclinada. Foram utilizadas duas barras metálicas, dobradas em forma de alça e encaixadas na grelha (Figura 28.b).

FIGURA 28 – ENSAIO Inderbitzen MODIFICADO, EQUIPAMENTOS E AMOSTRAS DE ARGILA



a) Grade metálica no aparelho Inderbitzen com o orifício central vedado, e amostra ressecada



b) Sistema de “chuveiramento” e alça para apoio do corpo de prova na umidade natural

- b) sistema para alimentar o escoamento de água, capaz de manter a vazão constante e controlada. O equipamento utilizado foi o mesmo já descrito para o ensaio Inderbitzen, constituído por uma caixa d'água e um conjunto de tubulações e registros para controlar a vazão entre a rede e a caixa, e entre a caixa e o “chuveiramento”;
- c) peneiras circulares de malha quadrada e fina. Foram utilizadas peneiras com abertura de malha de 0,054 mm;
- d) recipientes para receber a água e partículas muito finas, na saída da superfície inclinada sob a peneira. Foram utilizados os mesmos reservatórios descritos no ensaio Inderbitzen, caixas plásticas com capacidade de 40 litros, sendo uma para cada etapa adotada no procedimento descrito a seguir, bem como para verificação da vazão antes do início do ensaio;

- e) materiais e equipamentos para compactação de solos, conforme previsto na NBR 7182, para ensaios com amostras remoldadas compactadas;
- f) demais materiais usuais de laboratório, como película transparente de PVC, cronômetro, balanças, dessecador, estufa, ferramentas para talhar corpos de prova, bisnaga e cápsulas.
- Instruções ou Procedimentos

*Preparação da amostra:*

Para ensaios em amostras indeformadas, talha-se o corpo de prova cúbico. Suas dimensões deverão ser compatíveis com o sistema de “chuveiramento”, ou seja, tanto quanto possível a água que escoar dos orifícios dos tubos de PVC deve incidir sobre a amostra.

Para a argila foram talhados dois blocos, com dimensões aproximadas de 20 x 15 x 5 cm (comprimento, largura, espessura). Com as aparas de solo resultantes, determinou-se a umidade da amostra. Um dos blocos assim obtido foi utilizado no ensaio da argila na umidade natural (Figura 28.b). O outro foi deixado exposto ao ar, durante cerca de duas semanas, para sofrer o ressecamento até a umidade higroscópica, provocando sua retração, fissuramento e empastilhamento característicos (Figura 28.a).

Para ensaios com amostras remoldadas, compacta-se o corpo de prova no equipamento do ensaio de compactação. Em seguida, o corpo de prova é retirado do molde cilíndrico com auxílio de macaco e cortado longitudinalmente ao meio. A superfície plana central resultante do corte receberá diretamente a incidência da água.

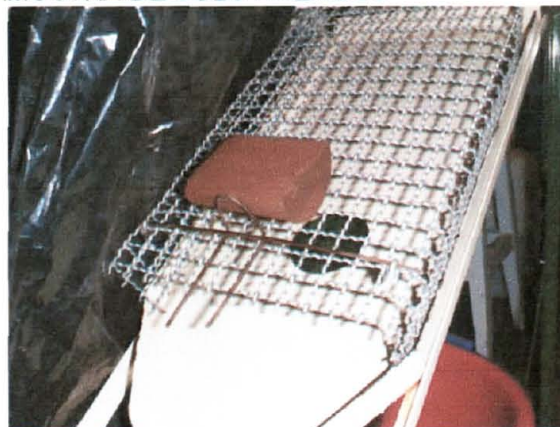
Para a amostra de solo arenoso foi moldado um corpo de prova em torno da umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima. Após a extração e corte do corpo de prova (Figura 29.a), uma das metades foi utilizada para ensaio com a umidade de compactação, e a outra para ensaio após secagem ao ar.



FIGURA 29 – ENSAIO INDERBITZEN MODIFICADO, AMOSTRA DE SOLO ARENOSO



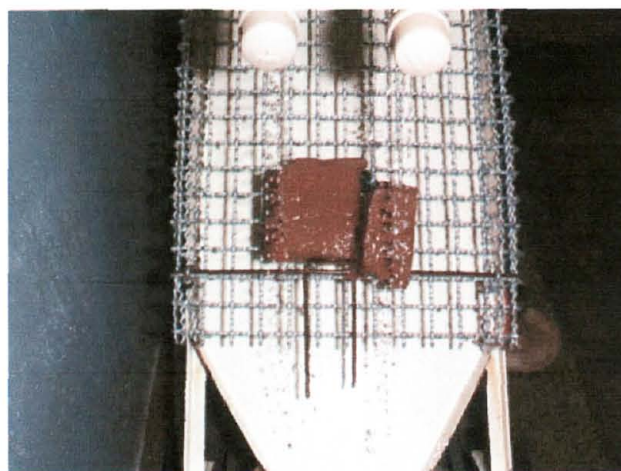
a) Corpo de prova compactado e cortado ao meio



b) Corpo de prova estreito e posição inadequada



c) Ensaio em andamento



d) Incidência concentrada e ruptura do corpo de prova

Por se tratar do último ensaio da pesquisa, a quantidade restante de material mostrou-se insuficiente para moldagem de corpo de prova no cilindro CBR, utilizando-se o cilindro pequeno do ensaio de Proctor. A qualidade do ensaio foi afetada (Figuras 29.c e 29.d), pois a largura insuficiente do corpo de prova obrigou o seu posicionamento no aparelho com o seu eixo longitudinal no sentido horizontal (Figura 29.b). A posição mais adequada para receber a incidência da água, seria com este eixo coincidente com a declividade da rampa.

#### *Ensaio:*

Como citado anteriormente, o ensaio é uma proposta recente e suas informações são exíguas (FREIRE, 2001; FREIRE e GALVÃO, 2002), tendo sido necessário estabelecer um procedimento para os ensaios da pesquisa. Com a decisão de utilizar o

aparelho Inderbitzen como suporte, optou-se por um procedimento semelhante para os dois ensaios, com os mesmos intervalos de leitura e duração. Além da facilidade, a semelhança de procedimentos permite comparar seus resultados, conforme apresentado na discussão dos ensaios (Capítulo 7). Fixou-se a grade na rampa, mantendo a inclinação de 34° em relação à horizontal. Foram empregadas vazões menores do que no ensaio Inderbitzen, tendo em vista o acréscimo de energia erosiva resultante do impacto das gotas.

Pesou-se o corpo de prova para a determinação da umidade inicial, bem como para o cálculo da perda de solo seco em relação ao peso total de solo seco no início do ensaio. Apesar da imprecisão determinaram-se as dimensões do corpo de prova com o paquímetro, para o cálculo aproximado da perda de solo por área exposta ao “chuveiramento”, numa tentativa de comparar seu resultado com o do ensaio Inderbitzen.

O corpo de prova foi posicionado na grade, com auxílio das alças de apoio. Executou-se o procedimento de controle da vazão com as caixas plásticas na saída d'água da rampa, tomando-se o cuidado de desviar o fluxo de água da amostra já posicionada na grade com auxílio de uma lona plástica (Figura 30.a). Foi adotado o mesmo procedimento de controle inicial da vazão, anteriormente descrito para o ensaio Inderbitzen (item 6.2.6).

Posicionou-se a peneira com abertura de malha 0,054 mm na saída de água da rampa (Figura 30.b), e a caixa plástica sob a peneira para captar o material mais fino. Retirou-se a proteção colocada para desviar a água do corpo de prova, iniciando o ensaio através do acionamento simultâneo do cronômetro. Em tempos previamente estabelecidos substituía-se a peneira posicionada na saída do escoamento da rampa, transferindo-se seu conteúdo para cápsulas que, após secagem em estufa, forneciam o peso seco do material erodido retido na peneira, em cada intervalo de tempo. Foi estabelecida a previsão inicial de duração dos ensaios em vinte minutos, com a possibilidade de prolongamento em caso de não ocorrer a estabilização da perda de solo no intervalo. As trocas de peneiras foram programadas para 1 , 5 , 10 e 15 minutos após o início do ensaio.



FIGURA 30 – ENSAIO INDERBITZEN MODIFICADO COM ARGILA NA UMIDADE NATURAL



a) Fluxo desviado para controle inicial de vazão



b) Início do ensaio, com detalhe da peneira



c) Detalhe da grelha, amostra e "chuveiramento"



d) Corpo de prova após o ensaio

Os procedimentos adotados no ensaio Inderbitzen, para controle da vazão durante o ensaio, determinação do peso de material que passa na peneira e fica retido na caixa plástica e da umidade final da amostra através do material restante do corpo de prova (Figura 30.d), foram repetidos no Inderbitzen Modificado.

A simples comparação dos resultados dos ensaios realizados com a argila na umidade natural (Figura 30) e ressecada (Figura 31), mostra a importância da umidade inicial na erosão desse solo, conforme discussão apresentada a seguir (Capítulo 7).



FIGURA 31 – ENSAIO InderBITZEN MODIFICADO COM ARGILA RESSECADA



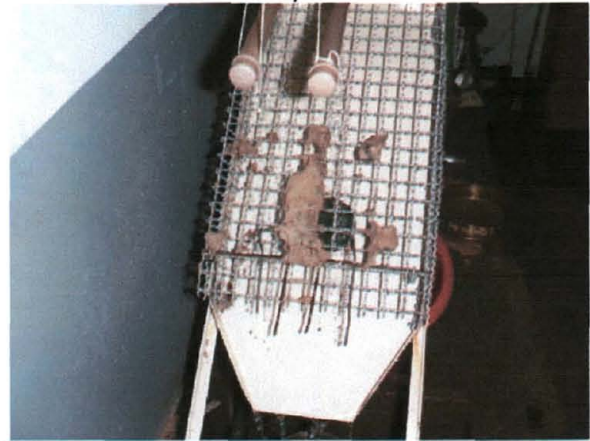
a) Corpo de prova antes do início do ensaio



b) Erosão rápida e intensa, com grande quantidade de solo retido na peneira



c) Detalhe do ensaio em andamento



d) Final da ensaio, bloco reduzido a fragmentos

#### *Cálculos e resultados:*

Nos relatos disponíveis (FREIRE, 2001; FREIRE e GALVÃO, 2002), dois resultados são apresentados: a erosão medida em relação ao tempo, e a comparação entre a granulometria da amostra e do material carregado. A erosão é calculada como porcentagem de material carregado, em relação ao peso inicial do corpo de prova. É apresentada através de gráficos “porcentagem acumulada de material erodido *versus* tempo”. Para a análise da granulometria, comparam-se no mesmo gráfico as curvas granulométricas da amostra e do material carregado em uma hora de ensaio.

Nos ensaios realizados adotou-se, além dessas determinações e gráficos, aqueles já descritos para o ensaio Inderbitzen. Foram apresentados os gráficos “tempo

*versus* perda de solo acumulada”. Para cada intervalo de tempo entre medidas adotado no ensaio, foi calculada a perda de solo através do peso do solo retido na peneira após secagem em estufa, acrescido do peso de solo que passa na peneira no mesmo intervalo. O peso de solo que passa na peneira foi obtido através do mesmo procedimento e cálculo do ensaio Inderbitzen (Equação 13). Os valores plotados no gráfico são perdas unitárias acumuladas, resultantes da razão entre a perda de solo acumulada e a superfície do corpo de prova sobre a qual atua o “chuveiramento” (Equação 12). Nesse teste a determinação da área é menos precisa do que no corpo de prova contido no anel do ensaio Inderbitzen.

Foram apresentados também os gráficos “tempo *versus* velocidade de erosão”. A razão entre a perda de solo unitária ocorrida e o tempo decorrido no intervalo, fornece a velocidade de erosão.

As umidades inicial e final da amostra foram determinadas com auxílio da estufa e indicadas nos resultados.

- Pontos de Verificação

Procedimentos adotados na preparação de amostras remoldadas : (ver item 6.2.1).

A qualidade do ensaio pode ser afetada por oscilações de vazão, quando o sistema de escoamento de água é conectado diretamente na rede. O grande volume de água necessário ao ensaio, impõe essa condição. O procedimento deve incluir alguma forma de verificação e controle da vazão antes e durante o ensaio, para permitir a correta interpretação dos resultados. A qualidade da água, especialmente o pH, deve ser controlado.

- Causas Prováveis de Erros

Os aspectos acima citados, da qualidade e quantidade de água, podem causar erros no ensaio.

Para permitir análises e comparações de comportamento de diferentes solos, ou do mesmo solo em diferentes estados, é necessário o controle e registro de condições ambientais de temperatura e umidade.

- Responsabilidades

O procedimento do ensaio e, principalmente, sua preparação não são simples, exigindo planejamento e cuidados para garantir a qualidade dos seus resultados. As etapas de preparação da amostra, execução do ensaio, análise do resultado e sua verificação, devem ser realizados por técnico, ou estagiário supervisionado por técnico, com treinamento em laboratório de geotecnia. A aprovação final deve ser de responsabilidade de engenheiro ou pesquisador da área de geotecnia.

- Anexos

A planilha do ensaio está apresentada ao final (Anexo 1).

## 7 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Estão resumidamente apresentados neste capítulo os resultados dos ensaios realizados para constituir o estudo de caso. Ao final de cada ensaio está apresentada a discussão dos resultados, complementando as descrições dos procedimentos apresentadas no Capítulo 6.

Conforme descrito anteriormente, para permitir a adequada implementação da metodologia, todas as análises envolveram duas amostras de solos, com características e comportamento diversos.

### 7.1 AMOSTRAS

A Amostra 1, mais importante para o estudo, é a argila siltosa rija, cinza e marrom, da Formação Guabirotuba, proveniente da Área 1 do Sítio Experimental de Geotecnia do Centro Politécnico da UFPR. Em dezembro de 2001, um poço aberto com auxílio de retroescavadeira, denominado poço 5, permitiu a coleta de várias amostras em torno de 3,0 m abaixo da superfície do terreno, para utilização em diversas pesquisas em andamento na UFPR. Detalhes sobre os solos do Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR, bem como sobre essa coleta de amostras, podem ser encontrados em Kormann (2002). Para o estudo em questão, foi utilizada uma amostra indeformada em bloco, registrada no laboratório como 4.0047.00, coletada em torno de 2,80 m abaixo da superfície do terreno. O bloco tinha dimensões aproximadas de 30 x 30 x 60 cm, pois nessa argila resultam sempre amostras irregulares. Ficou protegido por várias camadas de parafina e bandagem, desde o momento da coleta no campo, durante o transporte ao laboratório e manutenção em câmara úmida. Após a retirada de material para cada corpo de prova, talhado na própria câmara úmida, a proteção era refeita. Além do bloco, foram também coletadas no mesmo local amostras indeformadas em anéis metálicos, cuidadosamente cravados nos taludes da escavação, para os ensaios Inderbitzen. Cada anel foi protegido com filme transparente de PVC em várias camadas e, finalmente, recoberto por papel metálico. Como já era previsto, com base na prática de

campo e laboratório com esse material, o trabalho com a argila rija da Formação Guabirota foi demorado e complicado, exigindo cuidados especiais na coleta, preparação, execução e interpretação dos resultados de ensaios e análises.

A Amostra 2 é constituída por solo areno-argiloso, de procedência ignorada, fato sem importância tendo em vista a finalidade de seu emprego na pesquisa. O objetivo da utilização dessa amostra foi permitir o aprendizado dos métodos de ensaio e análise, com solo de manipulação mais fácil e rápida do que a argila da Amostra 1. Além disso, a confrontação de seus resultados com os da amostra 1, permitiu algumas comparações entre solos argilosos e arenosos, bem como entre solos indeformados e compactados. Tratava-se de material disponível no laboratório como sobra de atividades didáticas, disponível apenas na forma de amostra deformada, seca ao ar até a umidade higroscópica e destorroada com auxílio de almofariz e mão de gral recoberta de borracha. Todas as análises com este material devem ser consideradas como amostra remoldada e os corpos de prova compactados em torno da umidade ótima e da densidade aparente seca máxima do ensaio de compactação Proctor Normal.

A Amostra 1, por se tratar de material proveniente de área de pesquisa com diversos estudos e trabalhos anteriormente realizados, já estava bem caracterizada. Assim, alguns dados de caracterização e sucção aqui apresentados e utilizados, não foram realizados especificamente para esta pesquisa, mas para diversos estudos do Sítio Experimental (KORMANN, 2002). Estão resumidos no item 7.2. a seguir.

A caracterização da Amostra 2, também apresentada no item 7.2., foi inteiramente realizada para a pesquisa, de modo a permitir associar os resultados de ensaios de erosão com o tipo de solo.

## 7.2 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICAS, COMPACTAÇÃO E SUCÇÃO

a) resultados dos ensaios da argila (Amostra 1):

- Granulometria (Gráfico 1):

Argila (menor que 2 $\mu\text{m}$ )	= 53 %
Silte (entre 2 $\mu\text{m}$ e 0,06 mm)	= 41 %
Areia (entre 0,06 e 2,00 mm)	= 6 %
Pedregulho (entre 60 e 2,0 mm)	= 0

- Umidade higroscópica:  $W_{\text{hig}} = 10,1\%$
- Umidade natural:  $W_{\text{nat}} = 25 \%$
- Peso específico real dos sólidos (método DNER):  $\gamma_g = 27,02 \text{ kN/m}^3$
- Limite de liquidez:  $LL = 63 \%$
- Limite de plasticidade:  $LP = 25 \%$
- Índice de plasticidade:  $IP = LL - LP = 38$
- Índice de atividade:  $IA = IP / \% \text{ argila} = 0,72$
- Sucção para a umidade natural (25%)  $\cong 2500 \text{ kPa}$
- Sucção para a umidade higroscópica (10,1%)  $> 25000 \text{ kPa}$

Observação: foram realizadas determinações de sucção até a umidade de 14%, obtendo-se o valor máximo acima indicado.

Classificações geotécnicas:

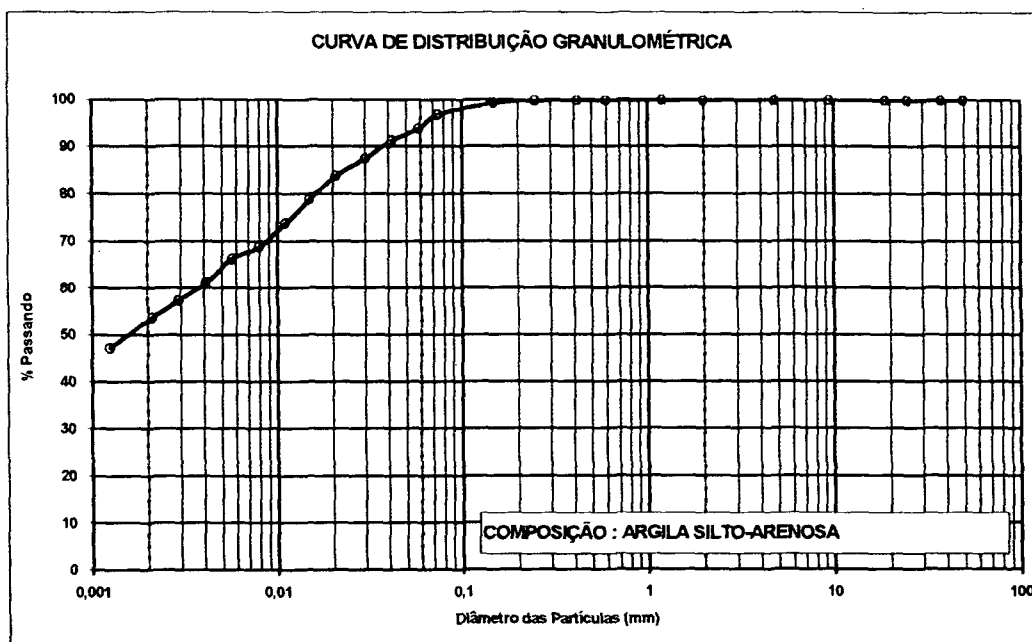
- ABNT (NBR 6502) = argila silto-arenosa
- Sistema rodoviário HRB-AASHTO = A-7-6 (20)
- Sistema Unificado = CH

Observações:

- conforme citado anteriormente, a maior parte destes ensaios de caracterização da argila provêm de diversos estudos realizados no Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR, principalmente de Kormann (2002);
- os ensaios de sucção acima foram realizados em amostras indeformadas na umidade natural, e os de caracterização em amostras destorroadas após secagem ao ar até a umidade higroscópica (via seca). As amostras da argila rija da Formação

Guabirota preparadas sem secagem (via úmida), podem apresentar resultados significativamente diferentes dos aqui apresentados, para determinados ensaios (BOSZCZOWSKI, 2001; KORMANN, 2002), conforme discussão apresentada no final deste item 7.2.

GRÁFICO 1 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA, ARGILA PREPARADA POR VIA SECA



b) resultados dos ensaios do solo arenoso (Amostra 2):

- Granulometria (Gráfico 2):

Argila (menor que 2 $\mu$ m)	= 17,8 %
Silte (entre 2 $\mu$ m e 0,06 mm)	= 9,2 %
Areia (entre 0,06 e 2,00 mm)	= 73,0 %
Pedregulho (entre 60 e 2,0 mm)	= 0
Areia fina (entre 0,2 e 0,06 mm)	= 43,0 %
Areia média (entre 0,6 e 0,2 mm)	= 29,9 %
Areia grossa (entre 2,0 e 0,6 mm)	= 0,1 %

- Umidade higroscópica:  $W_{hig} = 1,0\%$
- Peso específico real dos sólidos (método DNER):  $\gamma_g = 26,59 \text{ kN/m}^3$
- Massa específica real dos sólidos (método ABNT):  $\gamma_g = 26,75 \text{ kN/m}^3$

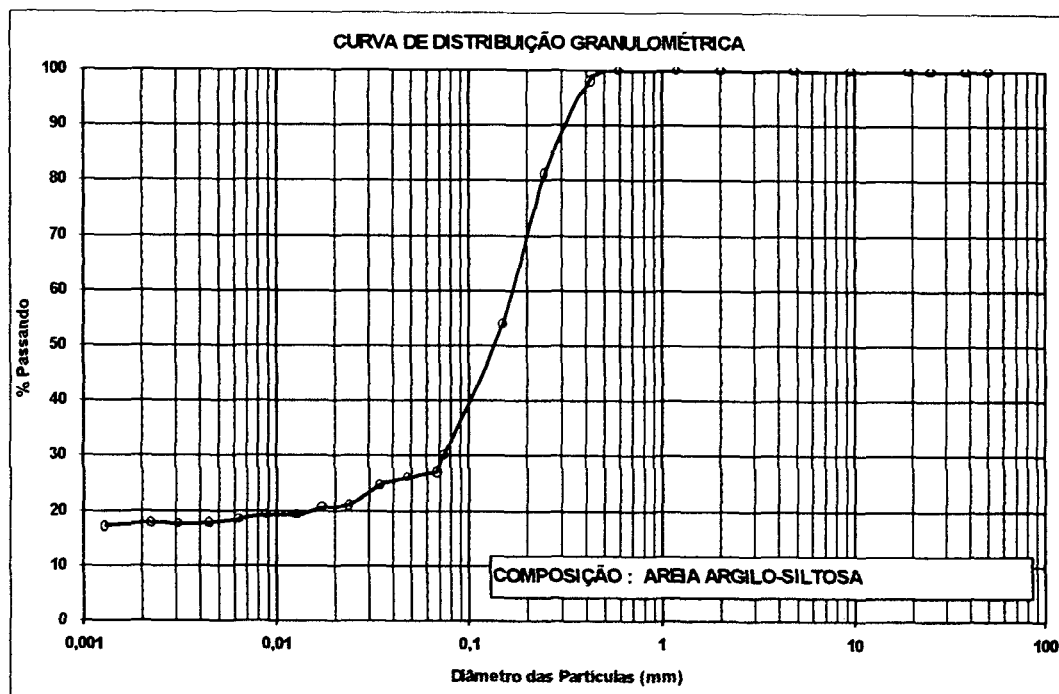


- Limite de liquidez:  $LL = 21 \%$
- Limite de plasticidade:  $LP = 13 \%$
- Índice de plasticidade:  $IP = LL - LP = 8$
- Índice de atividade:  $IA = IP / \% \text{ argila} = 0,45$
- Compactação normal:
  - Peso específico aparente seco máximo:  $\gamma_s \text{ máx} = 19,8 \text{ kN/m}^3$
  - Umidade ótima:  $W_{ót} = 10,2 \%$

Classificações geotécnicas:

- ABNT (NBR 6502) = areia fina e média argilo-siltosa
- Sistema rodoviário HRB-AASHTO = A-2-4 (0)
- Sistema Unificado = SC

GRÁFICO 2 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA, SOLO ARENOSO PREPARADO POR VIA SECA



c) utilização dos resultados:

Os resultados desses ensaios tem diversas aplicações no estudo de erosão. Além do interesse usual em caracterizar e classificar os solos envolvidos no estudo,

fornece os parâmetros para moldar corpos de prova compactados e permitem estabelecer correlações com umidade e sucção. Finalmente, constituem uma das formas utilizadas em estudos de erosão hídrica de solos.

A avaliação da suscetibilidade de um solo à erosão através de ensaios de caracterização geotécnica, é uma forma indireta de realizar o estudo. Diversos autores (FONSECA e FERREIRA, 1981; BASTOS, 1999; ARAÚJO, 2000) destacam os estudos pioneiros nesse sentido, realizados no âmbito do LNEC-Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de Lisboa, a partir da década de 50. Além de contemplar outros testes, como os de expansibilidade, petrificação e resistência ao cisalhamento (NASCIMENTO e CASTRO, 1974), os estudos do LNEC baseiam-se também em correlações com ensaios de caracterização geotécnica.

Com os parâmetros disponíveis puderam ser utilizados métodos de avaliação indireta baseados na granulometria e nos limites de Atterberg. Destacam-se a seguir três desses critérios.

c.1) critério baseado na granulometria, conforme a Equação 14 (ARAÚJO, 2000):

$$a = \frac{\sum y}{100 \cdot n} \quad (14)$$

onde:

y = porcentagem de grãos que passam nas peneiras de números 7, 14, 25, 50, 100 e 200 (ou correspondentes);

n = número de peneira (seis).

Considera-se que os solos com comportamento regular a bom, apresentam valores de “a” compreendidos entre 0,52 e 0,92.

Como não são peneiras usuais, utilizou-se o critério alternativo, avaliado pela porcentagem que passa na peneira # 40 (0,48 mm). Caso essa porcentagem esteja compreendida entre 49 e 96%, prevê o critério que o solo tem comportamento de regular a bom (BASTOS, 1999; ARAÚJO, 2000).

Para os materiais estudados, vem:

- Amostra 1 – argila: % que passa na peneira # 40 = 100% > 96%
- Amostra 2 – solo arenoso: % que passa na peneira # 40 = 98,2% > 96%.

Os materiais estudados não são considerados como tendo comportamento favorável (regular a bom) em relação à erosão.

c.2) critério proposto por Meireles em 1967, citado por Bastos (1999), envolvendo a granulometria e a plasticidade, através da porcentagem passando na peneira # 200, o limite de liquidez e o índice de plasticidade. Classifica os solos em:

- fortemente erodíveis:  $LL \leq 21\%$ ,  $IP \leq 8\%$  e passando na #200  $\leq 20\%$ ;
- passíveis de forte erosão: passando na #200 entre 20 e 40%;
- pouco erodíveis: passando na #200  $\geq 40\%$ .

Para os materiais estudados, vem:

- Amostra 1 – argila:  $LL = 63\% > 21\%$ ,  $IP = 38 > 8$ ,  
passa na #200 = 96,9%  $> 40\%$
- Amostra 2 – solo arenoso:  $LL = 21\%$ ,  $IP = 8$ ,  
passa na #200 = 30,3% entre 20 e 40%

A argila é pouco erodível, e o solo arenoso fortemente erodível e passível de forte erosão.

c.3) critério com base nos limites de Atterberg (FONSECA e FERREIRA, 1981; ARAÚJO, 2000):

Solos com comportamento bom a regular, para limite de plasticidade  $LP \leq 32\%$  e índice de plasticidade  $IP \leq 17$ .

A aplicação desse critério aos materiais estudados, resulta:

- Amostra 1 – argila:  $LP = 25\% < 32\%$  e  $IP = 38 > 17$
- Amostra 2 – solo arenoso:  $LP = 13\% < 32\%$  e  $IP = 8 < 17$ .

O solo arenoso é classificado como de comportamento bom a regular, contrariando a avaliação anterior baseada na granulometria. Pode-se supor que sua granulometria favorece a erosão, mas sua plasticidade não. A argila tem avaliação desfavorável, confirmando a da granulometria.

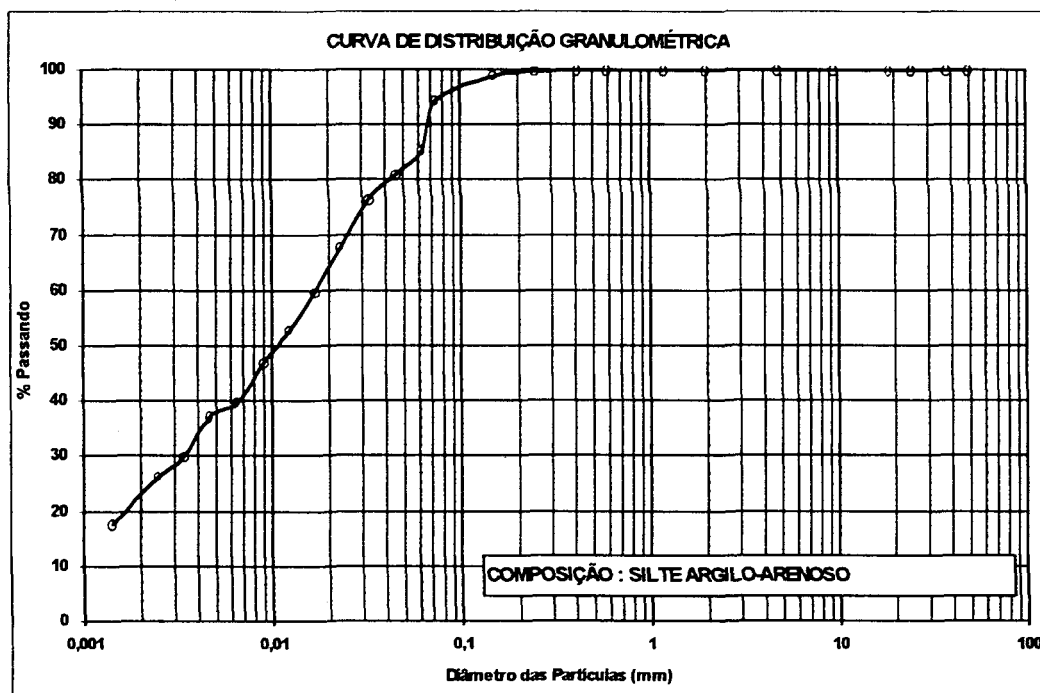
d) discussão dos resultados:

O primeiro aspecto a destacar é a eventual influência do procedimento de preparação das amostras nos seus resultados. Esse não era o escopo da pesquisa, porém tal fato pode ter interferido nos seus resultados. Determinados solos podem

apresentar resultados diversos em ensaios, em função do procedimento de preparação das amostras (SHERARD et al., 1976b; VERTAMATTI, 1988). Especificamente para o solo argiloso da Formação Guabirotuba, outras pesquisas (BOSZCZOWSKI, 2001; KORMANN, 2002) comprovam que o procedimento rotineiro de preparação por via seca, que inclui a secagem da amostra até a umidade higroscópica e seu destorroamento, conduz a resultados diferentes de ensaios com preparação da amostra por via úmida, isto é, sem a secagem até a umidade higroscópica.

Para fins de comparação, indicam-se resultados de alguns ensaios de caracterização geotécnica realizados para a Amostra 1 preparada por via úmida. O destorroamento da amostra para os ensaios de granulometria e limites de Atterberg, foi realizado colocando-se o solo em um recipiente com água destilada, de modo a formar uma lama. Lentamente e em diversas sessões, o solo ia sendo reduzido dentro da água, por esmagamento com as mãos e com auxílio de peneiras cada vez mais finas. A secagem, quando necessária para determinado ensaio, era realizada apenas até a umidade de ensaio, e não até a umidade higroscópica como no procedimento rotineiro.

GRÁFICO 3 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA, ARGILA PREPARADA POR VIA ÚMIDA



- Limite de liquidez:  $LL = 47 \%$
- Limite de plasticidade:  $LP = 30 \%$
- Índice de plasticidade:  $IP = LL - LP = 17$

Com base nos ensaios da amostra preparada por via úmida, os critérios de avaliação indireta da suscetibilidade à erosão, anteriormente descritos, ficam:

- Porcentagem que passa na peneira # 40 =  $100 \% > 96 \%$  , não é regular a bom;
- Limite de liquidez  $LL = 47\% > 21\%$  , índice de plasticidade  $IP = 17 > 8$  , passa na #200 =  $95\% > 40\%$ , portanto é pouco erodível;
- Limite de plasticidade  $LP=30\% < 32\%$  e Índice de plasticidade  $IP=17$ , bom a regular.

Observou-se a significativa diferença entre os resultados dos ensaios realizados com amostras preparadas por via seca e por via úmida, confirmando sua influência na argila rija da Formação Guabirotuba. Até mesmo sua classificação segundo a NBR 6502, da ABNT, alterou-se significativamente, passando de argila silto-arenosa para silte argilo-arenoso. A avaliação da suscetibilidade à erosão, com os resultados obtidos por via úmida sofreu alterações, principalmente no que se refere à plasticidade.

Outro aspecto a discutir na avaliação indireta da suscetibilidade à erosão, é o fato de tratar-se de um critério que não permite levar em conta o estado do solo e sua umidade no momento do evento erosivo. Os ensaios diretos de avaliação de erosão, adiante apresentados e discutidos, comprovam a fundamental importância que o estado do solo e a sua umidade inicial tem (ARULANANDAN et al., 1975), especialmente no caso da argila estudada. O comportamento do solo é diverso se, no momento do contato com a água, ele estiver saturado, úmido ou ressecado. Através de avaliação indireta o resultado é o mesmo, ou seja, tais aspectos não são passíveis de consideração. A erodibilidade não deve ser considerada como uma característica do solo (D'AGOSTINI, 1999), pois depende de seu estado.

Conclui-se que a avaliação indireta, através de ensaios de caracterização geotécnica , pode servir apenas para uma primeira abordagem do problema. Porém, mesmo assim suas limitações devem ser conhecidas e consideradas.

### 7.3 ENSAIO DO TORRÃO ("CRUMB TEST")

Foram realizados 8 ensaios, sendo 6 com a amostra indeformada de argila e 2 com a amostra remoldada e compactada de solo arenoso. Cada ensaio envolveu 3 corpos de prova, constituídos por torrões aproximadamente esféricos. Os resultados estão resumidos a seguir (Tabela 2).

TABELA 2 – ENSAIO DO TORRÃO, DADOS E RESULTADOS

ENSAIO	1	2	3	4	5	6	7	8
Amostra	1 Argila	1 Argila	1 Argila	1 Argila	1 Argila	1 Argila	2 Solo arenoso	2 Solo arenoso
Condição inicial da Amostra	Indeformada, na umidade natural	Indeformada, na umidade natural	Indeformada, na umidade natural	Indeformada, na umidade natural	Indeformada, ressecada	Indeformada, ressecada	Compactada, na umidade ótima	Compactada na umidade ótima
Condição inicial dos torrões	Mantidos umidade natural	Mantidos umidade natural	Ressecados (15 dias)	Ressecados (15 dias)	Mantidos ressecados	Mantidos ressecados	Mantidos umidade Ótima	Mantidos umidade Ótima
"Diâmetros" torrões (mm)	de 7,2 a 10,1	De 7,8 a 10,2	de 6,6 a 9,6	de 8,6 a 9,7	De 6,2 a 9,6	de 6,6 a 9,4	de 9,1 a 10,2	de 9,0 a 10,5
Solução	Água destilada	Hidróxido de sódio	Água destilada	Hidróxido de sódio	Água Destilada	Hidróxido de sódio	Água Destilada	Hidróxido de sódio
Resultados	Grau 1 Não dispersivo	Grau 1 Não dispersivo	Grau 1 Não dispersivo	Grau 1 Não dispersivo	Grau 1 Não dispersivo	Grau 1 Não dispersivo	Grau 1 Não dispersivo	Grau 4 Fortemente disp.
Observação dos torrões	1 inalter. 1 fragm. 1 desagr.	2 desagr. 1 fragmentado	3 desagregados	3 desagregados	3 desagregados	3 desagregados	3 desagregados	3 dispersivos

#### Observações:

O comportamento dos corpos de prova citado em cada ensaio, é o resultado de avaliação feita após 1 hora, como preconiza a NBR 13601/96. Observações foram anotadas aos 5 e aos 10 min do início do ensaio, conforme recomendado por alguns

autores (SHERARD et al., 1976a; HEAD, 1994). No caso da amostra de argila, não foram observadas alterações significativas entre 5 e 10 min de ensaio. Porém, no solo arenoso ocorreram variações em tempos menores, conforme apresentado a seguir (Tabela 3).

TABELA 3 – ENSAIO DO TORRÃO, SOLO ARENOSO, OBSERVAÇÕES EM TEMPOS DIVERSOS

ENSAIO	GRAU E CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA		
	5 MINUTOS DE ENSAIO	10 MINUTOS DE ENSAIO	60 MINUTOS DE ENSAIO (FINAL)
7	Todos Grau 1 Não-dispersivos	Todos Grau 1 Não-dispersivos	Todos Grau 1 Não-dispersivos
8	1 Grau 2 Levemente dispersivo 2 Grau 3 Moderadamente dispersivos	Todos Grau 3 Moderadamente dispersivos	Todos Grau 4 Fortemente dispersivos

#### c) discussão dos resultados

A argila (Amostra 1) mostrou-se não-dispersiva em todas as condições de umidade inicial e estado do solo estudadas. Os corpos de prova esboroavam-se, desagregando-se facilmente e com frequência. A reação foi mais rápida e generalizada em torrões de solo seco ao ar, como nos ensaios 3 a 6. Não ocorreram variações significativas ao longo do tempo de ensaio.

O solo arenoso (Amostra 2) mostrou-se dispersivo em solução de hidróxido de sódio e não-dispersivo em água destilada. Em princípio, o método não se destina a testes em solo arenosos. Porém, como o solo arenoso ensaiado apresenta uma fração argila importante, de 17,8% conforme resultado apresentado no item 7.2, o ensaio é possível e apresentou resultados interessantes. No ensaio em água destilada observou-se apenas esboroamento e desagregação dos torrões. O ensaio mais agressivo, em solução de hidróxido de sódio, provocou a dispersão dos torrões. Ao final do ensaio, a nuvem coloidal ocupou totalmente o fundo dos béqueres. Os ensaios com o solo arenoso permitiram também constatar a influência do tempo de observação, tendo em



vista diferentes recomendações encontradas na literatura. Concluiu-se que é adequado efetuar observações e registros em diversos intervalos de tempo, incluindo um intervalo curto de 5 min do início do ensaio. Assim, as reações rápidas foram melhor observadas.

Outra observação resultante dos ensaios com o solo arenoso é a comprovação da utilidade do ensaio com a solução de hidróxido de sódio. Esse resultado sugere a possibilidade de ocorrência do fenômeno da dispersão em sua fração fina argilosa.

Constatou-se que o ensaio de torrão é um bom ensaio qualitativo que, por sua simplicidade e rapidez, serve para orientar sobre a necessidade de realização de outros tipos de ensaios mais precisos. Diversos autores (SILVEIRA et al., 1974; SHERARD et al., 1976a) consideram pouco representativo o ensaio realizado com hidróxido de sódio, pois afasta-se de condições usuais encontradas na natureza. Por esse motivo, consideram mais recomendado o ensaio do torrão com água destilada. Porém, o ensaio com solução de hidróxido de sódio mostrou-se interessante, pois indicou uma tendência que, em método mais suave com água destilada, não se revelou.

#### 7.4 ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO (“SLAKING TEST”)

Os ensaios envolveram 6 corpos de prova, sendo 4 com a amostra indeformada de argila e 2 com a amostra compactada de solo arenoso. Cada ensaio incluiu 2 corpos de prova no mesmo reservatório, permitindo comparações entre diferentes condições do mesmo solo. Os resultados indicados baseiam-se no critério de Holmgren e Flanagan (1977), citado por Santos (1997).

a) ensaios com a argila (Amostra 1):

*Ensaio:* 1 / Corpo de prova “A” (Tabela 4)

*Condições iniciais do corpo de prova:* indeformado, na umidade natural ( $W_{nat} = 25,2 \%$ )

*Dimensões do corpo-de-prova:* 6,2 x 6,4 x 5,5 cm

*Resultado:* fraturamento parcial lento, desde o início do ensaio; desagregação parcial por abatimento, dos 30 aos 60 min do ensaio.

TABELA 4 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO DA ARGILA NA UMIDADE NATURAL

OBSERVA- ÇÕES ↓	ALTURA AGUA →	NA BASE DO C.P.	1/3 DO C.P.	2/3 DO C.P.	IMERSÃO TOTAL
	TEMPO (min)→	0 a 30	30 a 45	45 a 60	60 a 1440 (24 h)
Ascensão capilar	Intens. Veloc.				
Expansão	Intens. Veloc.	Pequena Lenta (30min)			
Desagregação	Intens. Veloc.		Pequena Lenta(15 min)	Pequena Lenta(15 min)	
Rupturas	Intens. Veloc.			Pequenas Aos 54 min	
Dispersão	Intens. Veloc.				
Fraturamento	Intens. Veloc.	Pequeno Imediato	Pequeno Lento(15 min)	Pequeno Lento(15 min)	Grande Lento (24 h)
Outras observações		Afetado até o NA	Afetado até o NA	Rupt.: base Frat.: topo	Abertura fra- turas anteriores

Ensaio: 1 / Corpo de prova "B" (Tabela 5)

TABELA 5 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO DA ARGILA RESSECADA

OBSERVA- ÇÕES ↓	ALTURA AGUA →	NA BASE DO C.P.	1/3 DO C.P.
	TEMPO (min)→	0 a 30	30 a 45
Ascensão capilar	Intens. Veloc.	3,0 cm Em 15 min	
Expansão	Intens. Veloc.	Grande Imediata	
Desagregação	Intens. Veloc.	Grande Imediata	Grande Rápida(6min)
Rupturas	Intens. Veloc.		
Dispersão	Intens. Veloc.		
Fraturamento	Intens. Veloc.	Grande Imediato	Grande Rápido(6min)
Outras observações		Afetado no contato água	Fim ensaio (36 min)

Condições iniciais do corpo de prova: indeformado, talhado na umidade natural,  
deixado para secar ao ar por cerca de 15 dias ( $W_{hig} = 11,8 \%$ )

Dimensões do corpo de prova: 5,9 x 6,0 x 5,2 cm

*Resultado:* desagregação total por abatimento em 36 min de ensaio, iniciada imediatamente ao contato da água; fraturamento total dividindo o corpo de prova em dois aos 36 min de ensaio, iniciado imediatamente ao contato da água.

*Ensaio:* 2 / Corpo de prova "A" – realizado em duas partes, com ressecamento intermediário do corpo de prova

*1ª Parte:* (Tabela 6)

*Condições iniciais do corpo de prova:* indeformado, na umidade natural

*Dimensões do corpo-de-prova:* 5,5 x 5,9 x 5,6 cm

*Resultado:* desagregação parcial por abatimento, lenta desde o início do ensaio;  
fraturamento parcial, lento desde o início do ensaio.

TABELA 6 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 1ª PARTE, ARGILA UMIDADE NATURAL

OBSERVA- ÇÕES ↓	ALTURA AGUA →	NA BASE DO C.P.	1/3 DO C.P.	2/3 DO C.P.	IMERSÃO TOTAL
	TEMPO (min)→	0 a 30	30 a 45	45 a 60	60 a 1440 (24 h)
Ascensão capilar	Intens.	3,0 cm	1,0 cm	Até o topo	
	Veloc.	Até 10 min	Lento(15 min)	Lento(15 min)	
Expansão	Intens.	Pequena	Pequena	Pequena	
	Veloc.	Lenta	Lenta	Lenta	
Desagregação	Intens.	Pequena	Pequena	Pequena	Grande
	Veloc.	Lenta	Lenta	Rápida	Lenta (24 h)
Rupturas	Intens.	Pequenas	Grandes	Grandes	Grandes
	Veloc.	Aos 10 min	Em 15 min	Em 15 min	Lentas (24h)
Dispersão	Intens.				
	Veloc.				
Fraturamento	Intens.	Pequeno	Grande	Médio	Grande
	Veloc.	Lento	Em 15 min	Lento(15 min)	Lento (24 h)
Outras observações	Temp:25,2 °C		Temp:25,2 °C	Temp:25,1 °C	Temp:24,8 °C
	Umid. Ar:59%		Umid. ar:59%	Umid. ar:60%	Umid. Ar:52%

*2ª Parte:* (Tabela 7)

*Condições iniciais do corpo de prova:* após a conclusão da 1ª parte, o reservatório  
foi drenado, e o corpo de prova deixado para  
secar ao ar até a umidade higroscópica

*Resultado:* desagregação total por abatimento aos 45 min da segunda parte  
do ensaio, iniciada desde o contato da água; fraturamento parcial

desde o início até os 38 min da segunda parte do ensaio.

TABELA 7 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 2ª PARTE, ARGILA RESSECADA

OBSERVA- ÇÕES ↓	ALTURA AGUA →	NA BASE DO C.P.	1/3 DO C.P.	2/3 DO C.P.
	TEMPO (min)→	0 a 30	30 a 45	45 a 60
Ascensão capilar	Intens.	Pequena	¾ do c.p.	Até o topo
	Veloc.	Em 30 min	Em 15 min	Imediata
Expansão	Intens.			
	Veloc.			
Desagregação	Intens.	Pequena	Grande	Total
	Veloc.	Em 30 min	Em 15 min	Imediata
Rupturas	Intens.		Grande	
	Veloc.		Em 15 min	
Dispersão	Intens.			
	Veloc.			
Fraturamento	Intens.	Pequeno	Grande	
	Veloc.	Em 30 min	Aos 38 min	
Outras observações		Afetado até o NA		Fim ensaio (45min)

Ensaio: 2 / Corpo de prova "B" – realizado em duas partes, com ressecamento intermediário do corpo de prova

1a Parte: (Tabela 8)

TABELA 8 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 1ª PARTE, ARGILA UMIDADE NATURAL

OBSERVA- ÇÕES ↓	ALTURA AGUA →	NA BASE DO C.P.	1/3 DO C.P.	2/3 DO C.P.	IMERSÃO TOTAL
	TEMPO (min)→	0 a 30	30 a 45	45 a 60	60 a 1440 (24 h)
Ascensão capilar	Intens.	3,0 cm	1,0 cm	1,5 cm	Até o topo
	Veloc.	Lenta (30min)	Lento(15 min)	Lento(15 min)	Lento(15min)
Expansão	Intens.	Média	Pequena	Média	
	Veloc.	Lenta (30min)	Lenta	Lenta	
Desagregação	Intens.	Grande	Pequena	Grande	Grande
	Veloc.	Média	Lenta	Rápida	Rápida
Rupturas	Intens.	Grandes	Grandes	Grandes	Grandes
	Veloc.	Média	Lenta(15 min)	Lenta(15 min)	Rápidas
Dispersão	Intens.				
	Veloc.				
Fraturamento	Intens.	Grande	Grande	Médio	Grande
	Veloc.	Média	Em 15 min	Lento(15 min)	Rápido
Outras observações		Temp:25,2 °C Umid. Ar:59%	Temp:25,2 °C Umid. Ar:59%	Temp:25,1 °C Umid. ar:60%	Temp:24,8 °C Umid. Ar:52%

*Condições iniciais do corpo de prova - indeformado, na umidade natural*

*Dimensões do corpo de prova: 5,9 x 5,9 x 5,7 cm*

*Resultado: desagregação por abatimento parcial, lenta a rápida, desde o início do ensaio; fraturamento parcial, lento a rápido, desde o início do ensaio.*

*2ª Parte: (Tabela 9)*

*Condições iniciais do corpo de prova: após a conclusão da 1ª parte, o reservatório foi drenado e o corpo de prova deixado para secar ao ar até a umidade higroscópica*

*Resultado: desagregação total por abatimento aos 45 min da segunda parte do ensaio, iniciada no contato da água; fraturamento parcial desde o início da segunda parte do ensaio.*

**TABELA 9 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 2ª PARTE, ARGILA RESSECADA**

	ALTURA AGUA →	NA BASE DO C.P.	1/3 DO C.P.	2/3 DO C.P.
OBSERVA- ÇÕES ↓	TEMPO (min)→	0 a 30	30 a 45	45 a 60
Ascensão capilar	Intens.	¼ do c.p.	¾ do c.p.	Até o topo
	Veloc.	Lenta(30 min)	Lenta(15 min)	Imediata
Expansão	Intens.			
	Veloc.			
Desagregação	Intens.	Grande	Média	Total
	Veloc.	Lenta(30 min)	Lenta(15 min)	Imediata
Rupturas	Intens.	Médias		
	Veloc.	Lenta(30min)		
Dispersão	Intens.			
	Veloc.			
Fraturamento	Intens.	Grande		
	Veloc.	Lento(30min)		
Outras observações		Fragmentos desagregam		Fim (45min) ensaio

b) ensaios do solo arenoso (Amostra 2) e resultados

*Ensaio: 3 / Corpo de prova "A" – realizado em duas partes, com ressecamento intermediário do corpo de prova*

*1a Parte: (Tabela 10)*

*Condições iniciais do corpo de prova - compactado, na umidade ótima*

Dimensões do corpo de prova: 5,8 x 6,4 x 6,4 cm

Resultado: fraturamento pequeno e lento, desde os 45 min de ensaio; desagregação por abatimento pequena, só no início (colocação de água) das duas etapas iniciais; possível dispersão ("espuma") aos 30 min do ensaio.

TABELA 10 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 1ª PARTE, SOLO ARENOSO NA UMIDADE ÓTIMA

OBSERVA- ÇÕES ↓	ALTURA AGUA →	NA BASE DO C.P.	1/3 DO C.P.	2/3 DO C.P.	IMERSÃO TOTAL
	TEMPO (min)→	0 a 30	30 a 45	45 a 60	60 a 1440 (24 h)
Ascensão capilar	Intens.	3,0 cm	Parte do topo	Todo o topo	
	Veloc.	Em 30 min	Em 15 min	Até os 55 min	
Expansão	Intens.				
	Veloc.				
Desagregação	Intens.	Pequena	Pequena		
	Veloc.	Até os 5 min	Lenta		
Rupturas	Intens.				Grande
	Veloc.				Lenta (24h)
Dispersão	Intens.				
	Veloc.				
Fraturamento	Intens.			Médio	Pequeno
	Veloc.			Lento(15 min)	Lento (24 h)
Outras observações		Desagreg. nos cantos	nos "Espuma" na superfície		Rupt. profunda no centro

2ª Parte: (Tabela 11)

TABELA 11 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO PROLONGADO, 2ª P., SOLO ARENOSO RESSECADO

OBSERVA- ÇÕES ↓	ALTURA AGUA →	NA BASE DO C.P.	1/3 DO C.P.	2/3 DO C.P.	IMERSÃO TOTAL
	TEMPO (min)→	0 a 30	30 a 45	45 a 60	60 a 1440 (24 h)
Ascensão capilar	Intens.	2/3 do c.p.	¾ do c.p.	Até 5,5 cm	
	Veloc.	Em 30 min	Em 15 min	Em 15 min	
Expansão	Intens.				
	Veloc.				
Desagregação	Intens.	Pequena	Pequena		Mínima
	Veloc.	Em 30 min	Em 15 min		Imediata
Rupturas	Intens.				Grandes
	Veloc.				Em 24 h
Dispersão	Intens.				
	Veloc.				
Fraturamento	Intens.				
	Veloc.				
Outras observações					

*Condições iniciais do corpo de prova:* após a conclusão da 1ª parte, o reservatório foi drenado e o corpo de prova deixado para secar ao ar até a umidade higroscópica.

*Dimensões aproximadas do corpo-de-prova:* 5,6 x 3,2 x 6,1 cm.

As dimensões foram apenas avaliadas, devido a dificuldade em medir com precisão o corpo de prova ressecado. A largura de 3,2m foi praticamente a metade da 1ª parte, devido a ruptura profunda que provocou a queda e imersão da outra metade do corpo de prova.

*Resultado:* abatimento pequeno desde o início do ensaio.

*Ensaio:* 3 / Corpo de prova "B" (Tabela 12)

TABELA 12 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO DO SOLO ARENOSO RESSECADO

OBSERVA- ÇÕES ↓	ALTURA AGUA →	NA BASE DO C.P.	1/3 DO C.P.	2/3 DO C.P.	IMERSÃO TOTAL
	TEMPO (min)→	0 a 30	30 a 45	45 a 60	60 a 1440 (24 h)
Ascensão capilar	Intens.	Parte do topo	Total		
	Veloc.	Em 30min	Em 15 min		
Expansão	Intens.	Média			
	Veloc.	Lenta (30min)			
Desagregação	Intens.	Grande	Grande	Grande	Grande
	Veloc.	Em 1 min	Imediata	Imediata	Imediata
Rupturas	Intens.			Médias	
	Veloc.			Lenta(15 min)	
Dispersão	Intens.				
	Veloc.				
Fraturamento	Intens.			Médio	Total
	Veloc.			Lento(15 min)	Imediato
Outras observações			"Espuma" na superfície		Fim ensaio (61 min)

*Condições iniciais do corpo de prova:* compactado e talhado na umidade ótima, deixado para secar ao ar ( $W_{hig} = 1,1 \%$ )

*Dimensões do corpo-de-prova:* 6,5 x 5,9 x 6,3 cm

*Resultado:* abatimento total aos 61 min da segunda parte do ensaio, iniciado no contato com a água; fraturamento total aos 61 min da segunda parte do ensaio, iniciado aos 45 min; possível dispersão ("espuma") desde os 30 min da segunda parte do ensaio.



### c) discussão dos resultados

As qualidades positivas desse método puderam ser constatadas em todos os ensaios realizados. Foi possível observar as características dos solos relacionadas com a erosão, comparar o comportamento entre diferentes solos, bem como o mesmo solo em diferentes estados. Associando essas qualidades com a facilidade de sua execução, que não requer qualquer equipamento especial, confirma-se sua conveniência na inclusão de estudos de erosão.

A heterogeneidade dos solos manifestou-se nos ensaios de maneira mais evidente do que no ensaio do torrão, devido ao fator de escala relacionado com as dimensões do corpo de prova. Observou-se a influência de descontinuidades características dos solos argilosos da Formação Guabirotuba, bem como das diferentes camadas de solo compactado no caso do solo arenoso.

Para a argila, o ensaio permitiu observar e avaliar a influência do ressecamento e do “empastilhamento” na erosão. Esse é o resultado mais evidente ao se comparar os ensaios 1-A e 1-B, com corpos de prova na umidade natural e ressecado, respectivamente.

O mesmo ocorre comparando-se os resultados obtidos com o solo arenoso mantido na umidade de compactação do ensaio 3-A 1ª parte, e o submetido a secagem ao ar no ensaio 3-B.

Como essas análises comparativas de resultados podem, eventualmente, ser influenciadas por heterogeneidades dos corpos de prova, elimina-se essa possibilidade com a metodologia de ensaios prolongados aqui proposta. O mesmo corpo de prova foi submetido, sucessivamente, ao ensaio com a umidade inicial mantida e após ressecamento até a umidade higroscópica. A umidade inicial é a natural no caso da argila dos ensaios 2-A e 2-B, e a ótima de compactação no caso do solo arenoso do ensaio 3-A. O ensaio simula o processo que ocorre na natureza em superfícies expostas às variações climáticas.

Em todas as comparações, os corpos de prova ressecados apresentaram maior intensidade e maior velocidade de desagregação, mais rupturas e fraturas, do que os de mesmo solo mantidos na umidade inicial. Como a ascensão capilar também é

exacerbada pelo ressecamento, os corpos de prova nessa condição são mais afetados acima do nível d'água.

É mais difícil comparar o comportamento entre a argila e o solo arenoso. No caso dos solos ressecados até a umidade higroscópica, o corpo de prova da argila desagregou-se totalmente em 36 min no ensaio 1-B, num processo de grande intensidade e velocidade. O solo arenoso ressecado do ensaio 3-B apresentou comportamento semelhante, porém mais lento, com a desagregação total após 61 min de ensaio.

Comparando o comportamento destes dois materiais mantendo-se a umidade inicial, verifica-se que, tanto o solo arenoso compactado do ensaio 3-A 1ª parte com a umidade ótima de compactação, como a argila indeformada do ensaio 1-A com a umidade natural, apresentaram menor suscetibilidade à erosão do que ressecados. Ambos os ensaios tiveram 24 horas de duração.

## 7.5 ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO

Foram realizados três ensaios, sendo dois com a amostra de argila e um com a amostra de solo arenoso. Os ensaios com a argila contemplaram as duas formas de preparação de amostras, segundo o procedimento usual (via seca) no ensaio 1 e por via úmida no ensaio 2. O ensaio 3 com o solo arenoso, foi preparado por via seca. Os resultados estão apresentados através de suas curvas granulométricas (Gráficos 4, 5 e 6, respectivamente). Na realidade foram realizados mais ensaios de dispersão SCS da argila preparada por via úmida (Gráfico 8), observando-se variações significativas em seus resultados e sugerindo que tal forma de preparação de amostras pode gerar dúvidas no que se refere à eficiência do destorroamento.

Como o ensaio sedimentométrico comparativo depende de comparação com a granulometria, foram utilizados os resultados da caracterização dos solos (Item 7.2), apresentados nos Gráficos 1, 2 e 3, para a argila preparada por via seca, solo arenoso por via seca e argila preparada por via úmida, respectivamente. Segundo a NBR 13602/1996, a dispersão do solo é avaliada através da porcentagem de dispersão,

conforme a equação 7. No resumo dos resultados dos ensaios a seguir, a porcentagem de dispersão foi calculada duas vezes. Uma tomando por base a porcentagem de partículas com diâmetro menor que 0,005 mm, conforme preconiza a NBR 13602/1996, e a outra conforme recomendado por alguns autores (e.g. HEAD, 1994), com base na porcentagem de partículas com diâmetro menor que 0,002 mm.

Alguns resultados dos ensaios sedimentométricos comparativos tornaram as curvas granulométricas SCS (Gráficos 4, 5 e 6) difíceis de comparar com as curvas granulométricas dos ensaios convencionais (Gráficos 1, 2 e 3). Por esse motivo foram feitas curvas de tendências, obtidas abandonando-se a menor quantidade possível de pontos resultantes no ensaio, de modo que a curva passasse a representar uma direção mais contínua e com maior concordância entre seus segmentos, conforme pode-se observar nos Gráficos 7, 8 e 9. Nestes gráficos as curvas resultantes dos ensaios sedimentométricos comparativos estão indicadas como “SCS”, enquanto as curvas de tendência estão indicadas como “SCS corrigido”, permitindo observar os pontos abandonados.

a) ensaios da argila (Amostra 1):

*Ensaio: 1 (Gráfico 4)*

*Procedimento de preparação da amostra: via seca*

*Umidade da amostra no início do ensaio: 10,5 %*

*Quantidade (massa) de solo utilizado: 25,27 g*

*Ensaio: 2 (Gráfico 5)*

*Procedimento de preparação da amostra: via úmida*

*Umidade inicial da amostra: 39,2 %*

*Quantidade (massa) de solo utilizado: 25,65 g*

GRÁFICO 4 - ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO 1, ARGILA (VIA SECA)

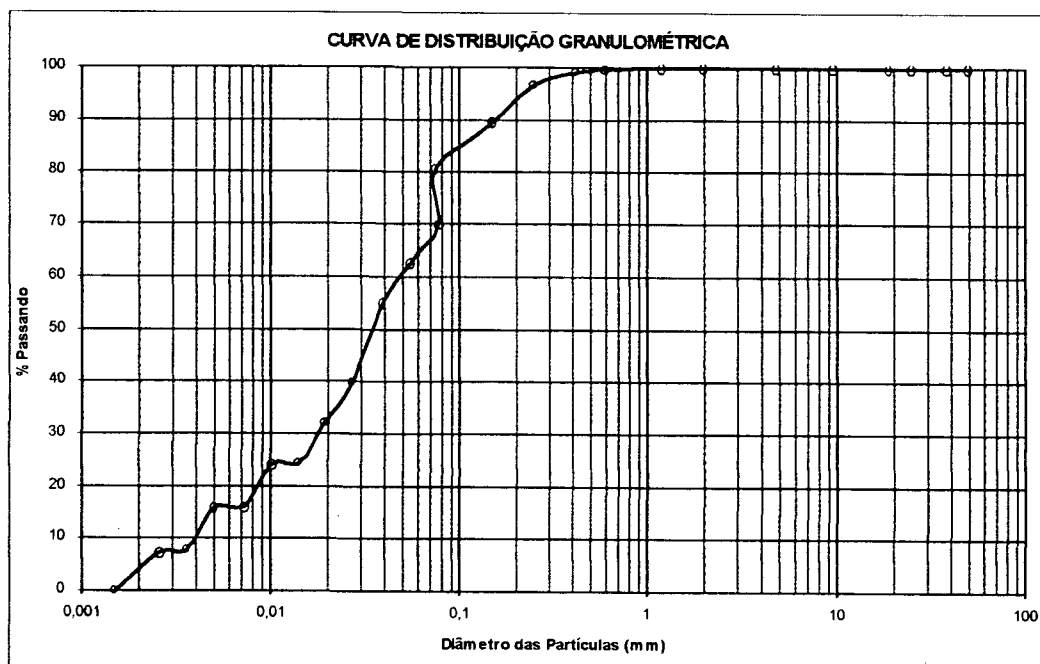
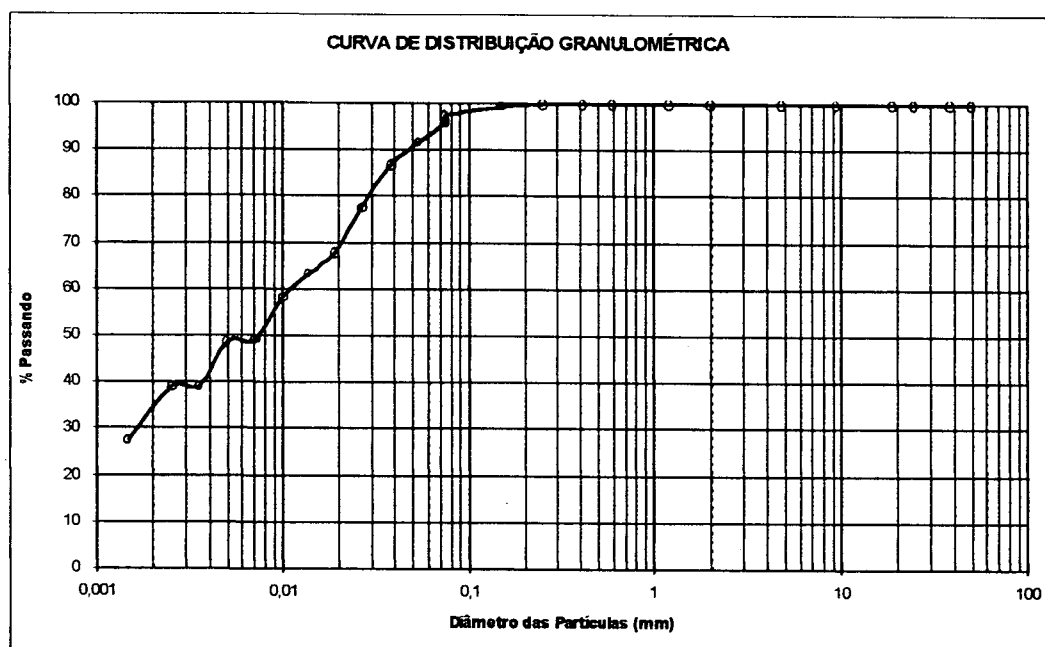


GRÁFICO 5 - ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO 2, ARGILA (VIA ÚMIDA)



b) ensaio do solo arenoso (Amostra 2)

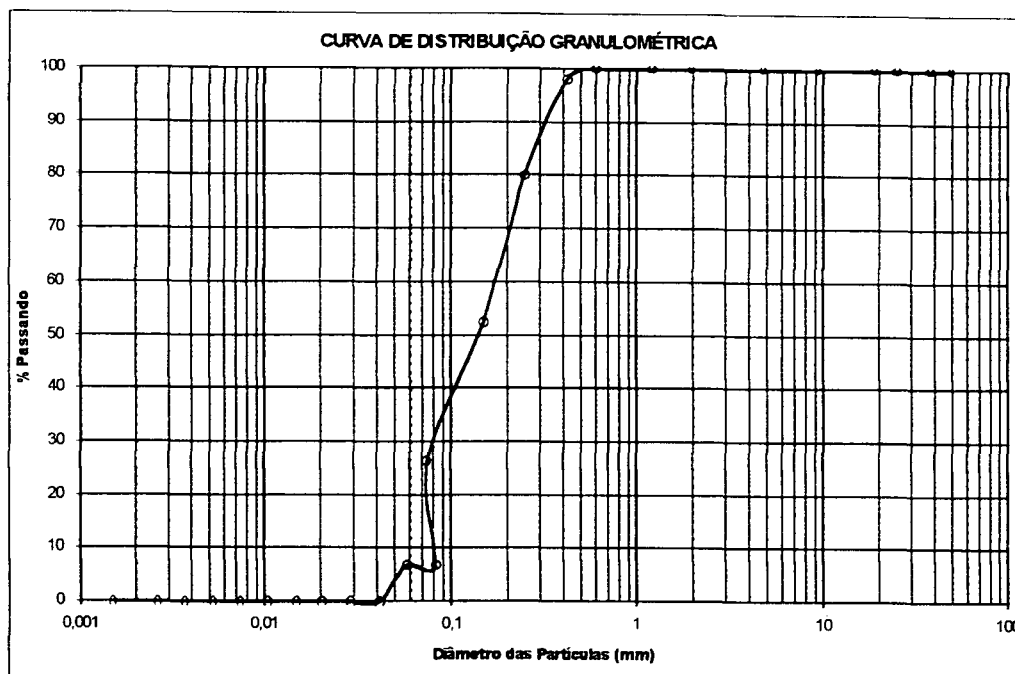
Ensaio: 3 (Gráfico 6)

Procedimento de preparação da amostra: via seca

Umidade inicial da amostra: 1,2 %

Quantidade (massa) de solo utilizado: 25,12 g

GRÁFICO 6 - ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO 3, SOLO ARENOSO (VIA SECA)



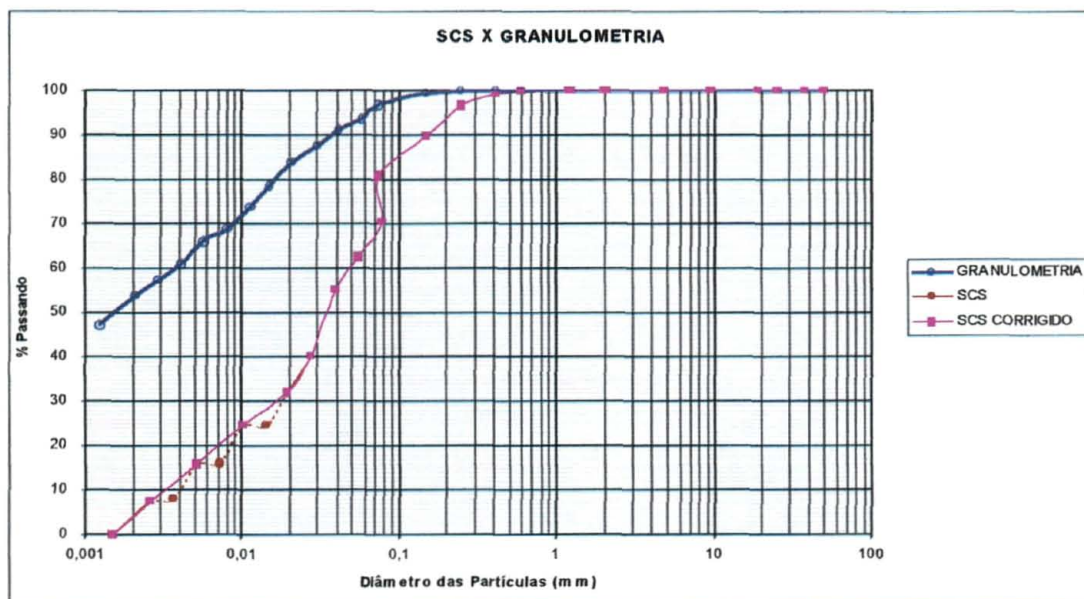
c) resultados dos ensaios:

Amostra: Argila preparada por via seca (Gráfico 7)

- % de partículas menores do que 0,002 mm (ensaio dispersão SCS):  $A_2 = 4,0 \%$
- % de partículas menores do que 0,005 mm (ensaio dispersão SCS):  $A_5 = 16,0 \%$
- % de partículas menores do que 0,002 mm (ensaio de granulometria):  $B_2 = 53,5 \%$
- % de partículas menores do que 0,005 mm (ensaio de granulometria):  $B_5 = 64,5 \%$
- porcentagem de dispersão para diâmetro menor do que 0,002 mm:  $(A_2/B_2) \times 100 = 8 \%$
- porcentagem de dispersão para diâmetro menor do que 0,005 mm:  $(A_5/B_5) \times 100 = 25 \%$

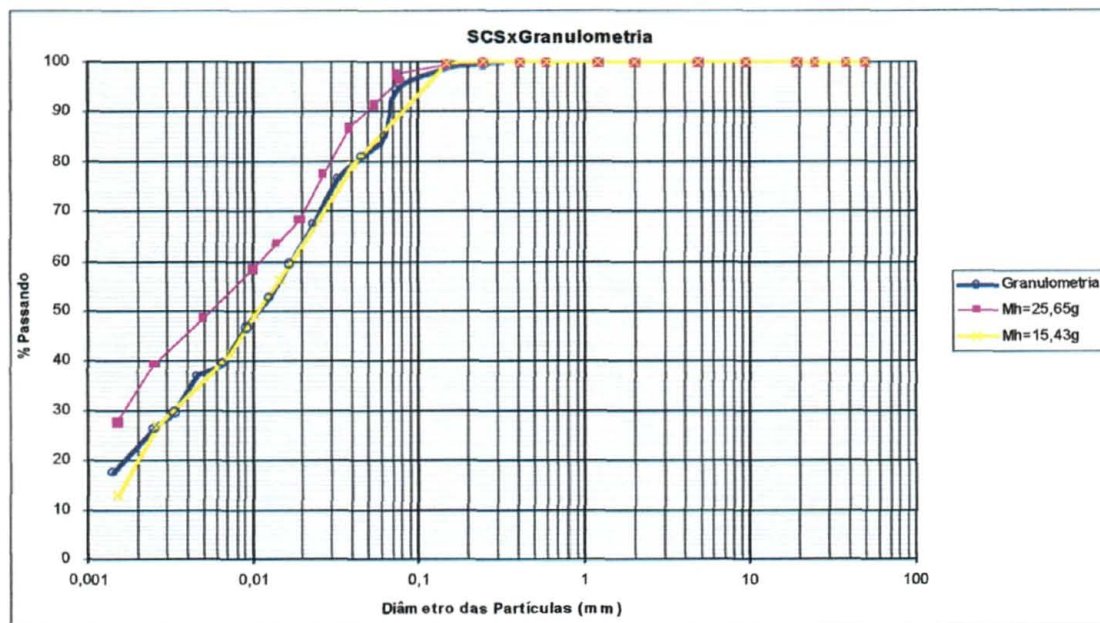
Avaliação: argila com maior proximidade da condição de não dispersiva, do que da condição de dispersiva

GRÁFICO 7 - ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO 1 E DE GRANULOMETRIA, ARGILA (VIA SECA)



Amostra: Argila, preparada por via úmida (Gráfico 8)

GRÁFICO 8 - ENSAIOS SEDIMENTOMÉTRICOS COMPARATIVOS (ENSAIO 2 E TESTE COM 15 g) E DE GRANULOMETRIA, ARGILA (VIA ÚMIDA)



- % de partículas menores do que 0,002 mm (dispersão SCS):  $A_2 = 34,0\%$
- % de partículas menores do que 0,005 mm (dispersão SCS):  $A_5 = 48,5\%$
- % de partículas menores do que 0,002 mm (granulometria):  $B_2 = 23,5\%$
- % de partículas menores do que 0,005 mm (granulometria):  $B_5 = 38,0\%$

*Avaliação:* impossível determinar a dispersão, pois as porcentagens do ensaio sedimentométrico dispersivo resultaram maiores do que as correspondentes do ensaio de granulometria. Foi realizado um segundo ensaio sedimentométrico comparativo com a argila preparada por via úmida. Este segundo ensaio serviu apenas para permitir uma análise de comportamento do solo preparado por via úmida, pois não foi seguida a NBR13602. Foi realizado com amostra de cerca de 15,0 g, em lugar das 25,0 g preconizadas pela norma brasileira. A curva granulométrica SCS resultante deste ensaio está apresentada também no Gráfico 8, para permitir sua comparação com a anteriormente descrita. Verifica-se que ocorre praticamente a coincidência dessa curva, com a curva granulométrica da argila preparada por via úmida. A única avaliação possível, é que a forma de preparação de amostras gera dúvidas. Provavelmente nem sempre ocorre o destorroamento completo e uniforme do solo.

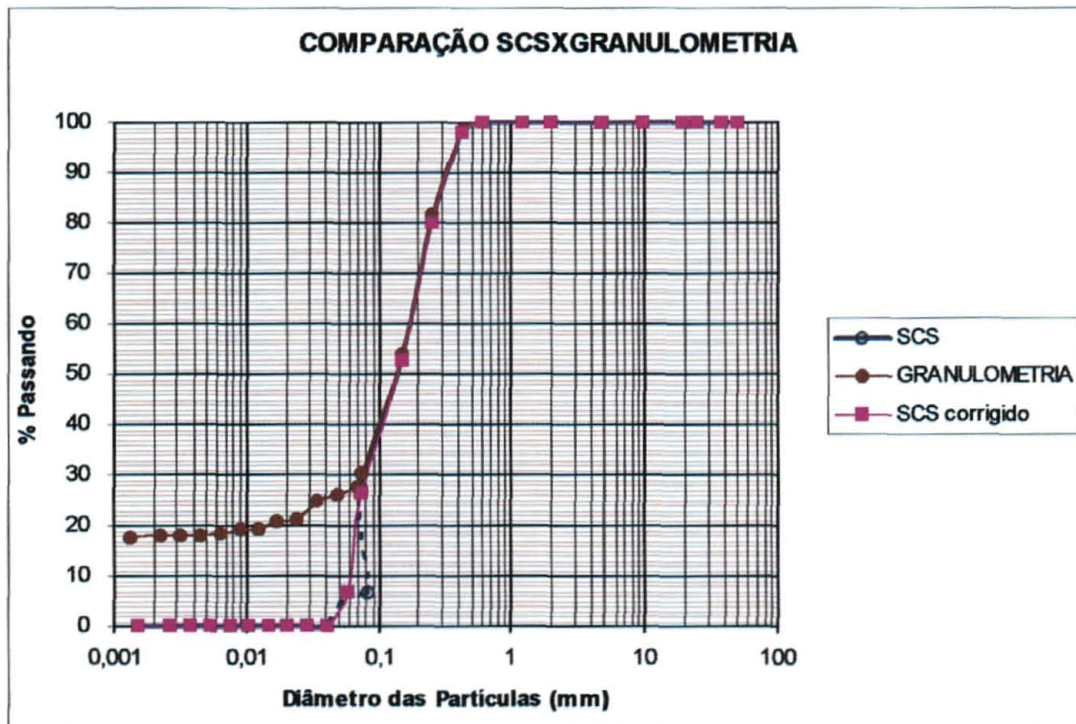
*Amostra:* Solo arenoso (Gráfico 9)

- % de partículas menores do que 0,002 mm (dispersão SCS):  $A_2 = 0$
- % de partículas menores do que 0,005 mm (dispersão SCS):  $A_5 = 0$
- % de partículas menores do que 0,002 mm (granulometria):  $B_2 = 18,0\%$
- % de partículas menores do que 0,005 mm (granulometria):  $B_5 = 18,5\%$
- porcentagem de dispersão para diâmetro menor do que 0,002 mm:  $(A_2 / B_2) \times 100 = 0$
- porcentagem de dispersão para diâmetro menor do que 0,005 mm:  $(A_5 / B_5) \times 100 = 0$

*Avaliação:* fração argila completamente não dispersiva (NBR 13602/1996)



GRÁFICO 9: ENSAIO SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO 3 E DE GRANULOMETRIA, SOLO ARENOSO (VIA SECA)



d) utilização dos resultados:

A avaliação apresentada, proposta pela NBR 13602/1996, é a consideração de argila completamente dispersiva para porcentagem de dispersão igual a 100%, e completamente não dispersiva se resultar igual a zero.

O critério para avaliação da erodibilidade do solo, com base na porcentagem de dispersão (ARAÚJO, 2000), citado anteriormente (Capítulo 6) é:

- 20% < Porcentagem de dispersão < 25%: Erodibilidade média
- 25% < Porcentagem de dispersão < 50%: Erodibilidade alta
- 50% < Porcentagem de dispersão : Erodibilidade muito alta.

De acordo com esse critério, que toma por base a porcentagem de partículas menores que 0,005 mm, a argila preparada por via seca apresenta “erodibilidade média a alta”, e o solo arenoso resulta com porcentagem inferior ao de “erodibilidade média”.

De acordo com o critério de Middleton para a avaliação da erodibilidade (BASTOS, 1999), calculando-se a razão de dispersão (RD) segundo a Equação 8, resulta:

*Amostra:* Argila preparada por via seca (Gráfico 7)

- % de partículas menores do que 0,05 mm (dispersão SCS): A = 60 %

- % de partículas menores do que 0,05 mm (granulometria): B = 93 %

- razão de dispersão:  $(A / B) \times 100 = 65 \%$

*Avaliação:* solo erodível

*Amostra:* Solo arenoso (Gráfico 9)

- % de partículas menores do que 0,05 mm (dispersão SCS): A = 3,5 %

- % de partículas menores do que 0,05 mm (granulometria): B = 26,5 %

- razão de dispersão:  $(A / B) \times 100 = 13 \%$

*Avaliação:* solo não erodível

f) discussão dos resultados:

Os dois critérios de avaliação da erodibilidade indicados, da porcentagem de dispersão (ARAÚJO, 2000) e da razão de dispersão (BASTOS, 1999), conduzem a resultados semelhantes para os solos estudados.

Apesar da dificuldade de comparar estes critérios com a avaliação da NBR 13602, que contempla apenas casos limites, verifica-se uma certa discordância entre eles. Essa discordância permite supor que solos com fração argila não dispersiva ou com pequena tendência à dispersão, podem ter alta erodibilidade.

As avaliações segundo o ensaio sedimentométrico comparativo, em grande parte confirmam as conclusões de outros ensaios.

Confirma-se assim, para os solos estudados, a utilidade do ensaio sedimentométrico comparativo. Principalmente ao se considerar que o ensaio não apresenta dificuldades operacionais maiores do que os ensaios convencionais de granulometria, nem envolve outros equipamentos.

Algumas dúvidas ocorreram na aplicação dos resultados desse ensaio, como a porcentagem a considerar (0,005 ou 0,002 mm), a forma de preparação da amostra e as “correções” para permitir as análises realizadas.

A provável causa dos trechos escalonados dos gráficos, que exigiram as correções citadas, é a pequena quantidade de solo utilizada no ensaio sedimentométrico comparativo, de apenas 25 g, enquanto que no ensaio convencional de sedimentação utiliza-se de 70 a 120 g, dependendo do tipo de solo. O densímetro preconizado pelas respectivas normas em ambos os ensaios, é o mesmo. É possível que pequenas diferenças na quantidade de solo em suspensão não sejam mensuráveis pelo densímetro, resultando em patamares horizontais na curva. Maior precisão na determinação da densidade da suspensão seria conveniente, ao menos para solos como os do estudo.

Para solo com partículas maiores, como a amostra 2 de solo arenoso, podem resultar valores negativos na porcentagem de solo em suspensão no trecho final da curva. Este resultado, sem significado físico real, resulta da correção denominada leitura do densímetro em água destilada na mesma temperatura da suspensão, que tem sinal negativo na Equação 4. Para a obtenção do Gráfico 6, tais valores foram substituídos por pontos com porcentagens nulas.

## 7.6 ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA INTERSTICIAL DO SOLO

Foi realizada a análise de amostras de água intersticial extraídas dos dois solos, a argila (Amostra 1) e o solo arenoso (Amostra 2). Para comparar resultados entre diferentes métodos de análise química da água intersticial, apenas para fins da pesquisa, a extração da Amostra 1 envolveu volume muito maior que o usual para o ensaio. Devido a baixa permeabilidade da argila, foram necessárias diversas e prolongadas seções de extração da água, para obtenção de cerca de 150ml, constituindo uma única amostra submetida à análise química.

A análise química da água extraída da Amostra 1 foi submetida aos três métodos disponíveis nos laboratórios do LACTEC: a espectrofotometria de absorção atômica

indicada na NBR 13603, a cromatografia iônica e, finalmente, a combinação dos métodos de titulação complexométrica para cálcio (Ca) e magnésio (Mg), e de fotometria de chama para sódio (Na) e potássio (K).

A água extraída do solo arenoso foi analisada somente pelo método químico mais simples, resultante da combinação de titulação complexométrica e fotômetro de chama.

a) resultados dos ensaios:

Na Tabela 13 estão resumidos os resultados das análises das duas amostras de água intersticial extraídas, que são os teores de sais dissolvidos no extrato de saturação (Na, K, Ca e Mg). Na mesma tabela estão os valores calculados segundo a NBR 13603, que são a quantidade total de sais dissolvidos (Equação 9), porcentagem de sódio (Equação 10) e razão de absorção de sódio (Equação 11).

TABELA 13 - ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA INTERSTICIAL, DA ARGILA E DO SOLO ARENOSO

	AMOSTRA/ SOLO →	AMOSTRA 1 / ARGILA			AMOSTRA 2/ SOLO ARENOSO
	MÉTODOS →	EA <sup>(1)</sup>	CI <sup>(2)</sup>	T/F <sup>(3)</sup>	T/F <sup>(3)</sup>
TEORES DE SAIS NA ÁGUA INTERSTICIAL	Ca (meq/l)	1,747	2,046	1,796	1,992
	Mg (meq/l)	0,724	0,782	0,699	0,703
	Na (meq/l)	0,270	0,265	0,378	3,915
	K (meq/l)	0,061	0,049	0,074	0,552
PARÂ- METROS	TSD (meq/l)	2,802	3,142	2,947	7,162
	% Na	9,6	8,4	12,8	54,7
	RAS	0,243	0,223	0,338	3,373

NOTA: métodos de análise química:

(1) EA: espectrofotômetro de absorção atômica

(2) CI : cromatografia iônica

(3) T/F: titulação complexométrica (Ca e Mg) e fotometria de chama (Na e K)

b) utilização dos resultados:

Analisando a dispersão dos solos estudados segundo critério de Sherard et al. (1976a), a relação entre os valores de "TSD" e "%Na" indica que a argila é não-dispersiva. O solo arenoso resulta em uma faixa intermediária, entre solos dispersivos e não dispersivos. Recomendam estes autores que, nos casos intermediários, a dúvida seja esclarecida com base em outros ensaios, como o sedimentométrico comparativo e

o do furo de agulha. Os mesmos resultados são obtidos através do critério apresentado por Mitchell (1993), que envolve os três parâmetros, "TSD", "RAS" e "% Na".

Bastos (1999) cita o "critério australiano", segundo o qual solos dispersivos sujeitos ao fluxo de água livre de sais apresentam RAS superior a 1 ou 2. Confirmando o resultado da aplicação do critério "TSD x %Na", segundo o RAS a argila é não dispersiva e o solo arenoso novamente apresenta tendência à dispersão.

Arulanandan et al. (1975) apresentam critério baseado na relação entre os parâmetros "RAS" e "TSD", para avaliação da dispersão de argilas. De acordo com esse critério, a argila resulta não dispersiva. Obtém-se o mesmo resultado para o solo arenoso, porém o material não se enquadra exatamente nos casos previstos pelos autores citados.

#### c) discussão dos resultados:

Observou-se uma boa aproximação entre os resultados obtidos através das três formas de análise química utilizadas. O método de absorção atômica, juntamente com o de cromatografia iônica, são os mais precisos. Devem ser priorizados quando disponíveis. Porém, exigem equipamentos sofisticados e de custo elevado. Ao menos para a argila foi possível verificar que, em caso da falta desses equipamentos, o estudo feito através de titulação complexométrica e fotometria de chama teria sido suficiente.

Os resultados obtidos através da análise química da água intersticial do solo, apresentaram-se coerentes com a maior parte dos resultados dos demais ensaios destinados a avaliar a dispersão do solo.

Outros estudos com solos argilosos rijos da Formação Guabirotuba (MASSAD et al., 1981; BOSZCZOWSKI, 2001) indicam teores de sódio maiores que os determinados e, conseqüentemente, maior possibilidade de suscetibilidade à dispersão. A causa dessa variação pode estar relacionada a técnicas de coleta e manutenção das amostras de solo, a coleta e extração de amostras de água intersticial, ou a métodos e equipamentos de análise química. Porém, é mais provável que as diferenças sejam determinadas pela heterogeneidade dos solos dessa formação e pela influência dos diversos fatores ambientais e antrópicos que podem afetar os solos e a água intersticial.

## 7.7 ENSAIO DO FURO DE AGULHA

Foram realizados 10 ensaios do furo de agulha, sendo que 9 estão apresentados a seguir. Os gráficos de apresentação dos resultados são “vazão média *versus* carga hidráulica”, conforme a NBR 14114. Os dados foram obtidos de gráficos “vazão *versus* tempo” para cada carga hidráulica aplicada, conforme apresentado para o ensaio 1 apenas a título de exemplo. Para a classificação do solo segundo sua dispersibilidade, apresentada ao final da descrição de cada ensaio, adotou-se a recomendação da NBR 14114.

Dois ensaios foram realizados com o solo arenoso (Amostra 2), sendo o ensaio 8 próxima da umidade ótima de compactação e o ensaio 9 com o corpo de prova moldado nas mesmas condições e, posteriormente, deixado secar ao ar durante 15 dias.

Oito ensaios foram realizados em amostras indeformadas da argila (Amostra 1). Os ensaios 1 a 4 envolveram corpos de prova talhados e ensaiados na condição de umidade natural, e os ensaios 5 a 7 talhados na mesma condição e submetidos a um período de imersão em água dentro do tubo utilizado para o ensaio, com duração variada descrita em cada resumo. Os dados do último ensaio não foram apresentados por serem duvidosos, para o qual o corpo de prova foi submetido a uma secagem prévia ao ar. Operações não previstas na norma brasileira, como a utilização de massa de calafetar, descrita a seguir no ensaio Inderbitzen, foram necessárias. Porém, seu comportamento não diferiu significativamente dos ensaios com imersão prévia.

Os ensaios foram realizados com estágios de carga e descarga (SANTOS, 1999), conforme descrito anteriormente (Capítulo 6).

Na discussão dos resultados foram utilizados gráficos com o gradiente de carga hidráulica em escala aritmética, em lugar da carga hidráulica em escala logarítmica (SANTOS, 1999). Essa forma de representação, utilizada para comparação dos diferentes ensaios, destaca melhor os resultados.

a) ensaios da argila (Amostra 1):

a.1) argila na umidade inicial natural

*Ensaio: 1*

*Observações prévias e iniciais:*

- *Umidade inicial do solo: 23,7 %*
- *Massa específica aparente seca do corpo de prova: 1,53 g/cm<sup>3</sup>*
- *pH da água: 6,1*
- *Ambiente: temperatura: 21,8 °C      umidade: 62 %*
- *Utilização da guia de centralização: não*

*Observações durante o ensaio: (Tabela 14 e Gráfico 10)*

- *Andamento do ensaio: normal*
- *Furo refeito: não*

TABELA 14 - ENSAIO 1 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL

CARGA HIDRÁULICA (mm)	VAZÃO DO EFLUENTE (cm <sup>3</sup> /s)	TURBIDEZ DO EFLUENTE
50	0,3	Levemente escuro
180	1,4	Levemente escuro
380	2,4	Claro
1020	2,5	Claro
380	1,2	Claro
180	0,6	Claro
50	0,3	Claro

*Observações após o ensaio: vazões na descarga menores que na carga*

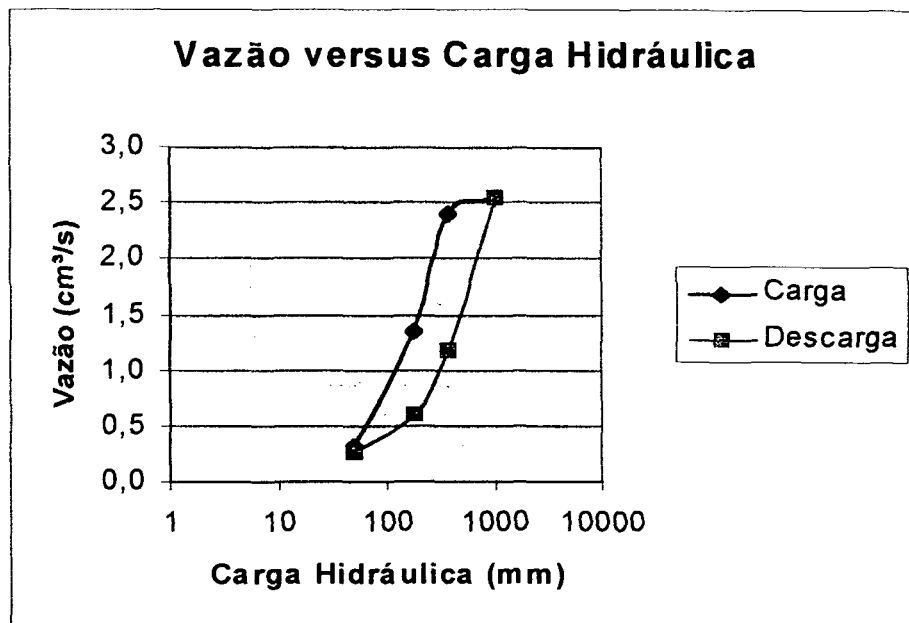
*Diâmetro final do furo: 2,3 mm na saída*

*Umidade final do solo: 27,5 %*

*Classificação quanto à dispersividade: ND1*



GRÁFICO 10 - ENSAIO 1 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL



**Ensaio: 2**

**Observações prévias e iniciais:**

Umidade inicial do solo: 24,2 %

Massa específica aparente seca do corpo de prova: 1,57 g/cm<sup>3</sup>

pH da água: 6,2

Ambiente: temperatura: 22,6 °C umidade: 69 %

Utilização da guia de centralização: sim

**Observações durante o ensaio: (Tabela 15 e Gráfico 11)**

Andamento do ensaio: normal

Furo refeito: não

**Observações após o ensaio:**

Diâmetro final do furo: 1,8 mm na saída

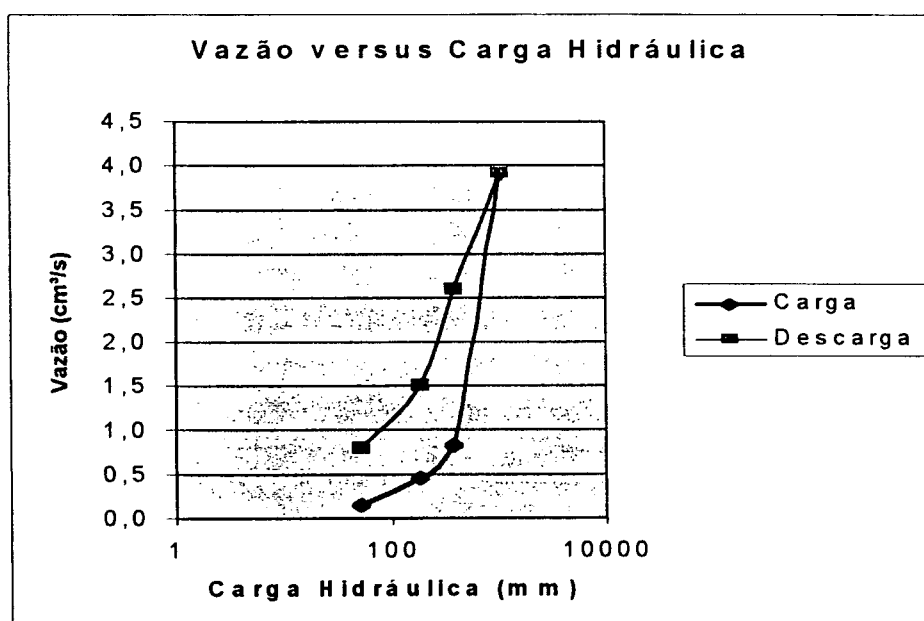
Umidade final do solo: 26,7 %

Classificação quanto à dispersividade: ND1

TABELA 15 - ENSAIO 2 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL

CARGA HIDRÁULICA (mm)	VAZÃO DO EFLUENTE TE (cm <sup>3</sup> /s)	TURBIDEZ DO EFLUENTE
50	0,2	Levemente escuro, passando a claro
180	0,5	Levemente escuro, passando a claro
380	0,8	Claro
(940)	3,9	Claro
380	2,6	Claro
180	1,5	Claro
50	0,8	Claro

GRÁFICO 11 - ENSAIO 2 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL



*Ensaio: 3*

*Observações prévias e iniciais:*

*Umidade inicial do solo: 20,7 %*

*Massa específica aparente seca do corpo de prova: 1,63 g/cm<sup>3</sup>*

*pH da água: 6,2*

*Ambiente: temperatura: 23,2 °C      umidade: 73 %*

*Utilização da guia de centralização: não*

Observações durante o ensaio: (Tabela 16 e Gráfico 12)

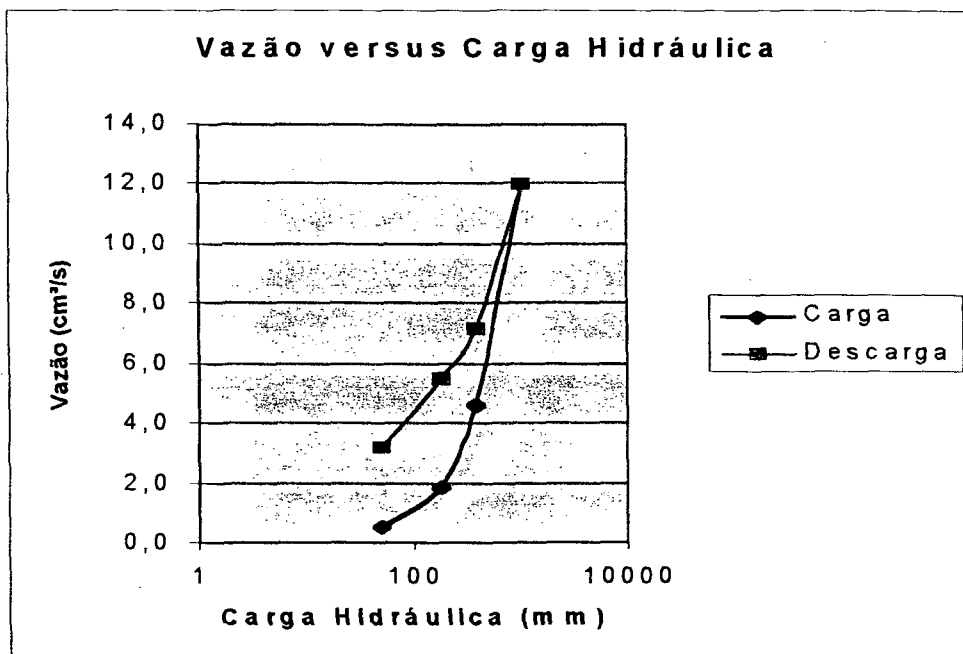
Andamento do ensaio: fluxo cessou na carga de 50 mm, ensaio reiniciado

Furo refeito: sim

TABELA 16 - ENSAIO 3 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL

CARGA HIDRÁULICA (mm)	VAZÃO DO EFLUENTE (cm <sup>3</sup> /s)	TURBIDEZ DO EFLUENTE
50	0,5	Escuro, passando a levemente escuro
180	1,8	Escuro, passando a levemente escuro
380	4,6	Levemente escuro, passando a claro
1020	12,0	Claro
380	7,1	Claro
180	5,4	Claro
50	3,2	Claro

GRÁFICO 12 - ENSAIO 3 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL



Observações após o ensaio:

Diâmetro final do furo: 3,2 a 3,8 mm no centro do corpo de prova

Umidade final do solo: 25,9 %

Classificação quanto à dispersividade: duvidosa

Ensaio: 4

Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo: 23,1 %

Massa específica aparente seca do corpo de prova: 1,57 g/cm<sup>3</sup>

pH da água: não determinado

Ambiente: temperatura: 23,6 °C umidade: 69 %

Utilização da guia de centralização: não

Observações durante o ensaio: (Tabela 17)

Andamento do ensaio: fluxo cessou na carga de 50 mm, ensaio reiniciado

Furo refeito: sim

TABELA 17 - ENSAIO 4 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL

CARGA HIDRÁULICA (mm)	VAZÃO DO EFLUENTE (cm <sup>3</sup> /s)	TURBIDEZ DO EFLUENTE
50	0,55	Escuro, passando a levemente escuro e Depois a claro

Observações após o ensaio: encerrado aos 10 min, para verificação do diâmetro

Diâmetro final do furo: 1,0 mm

Umidade final do solo: 26,9 %

Classificação quanto à dispersividade: duvidosa

a.2) argila com imersão prévia:

Ensaio: 5

Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo (antes da imersão): 23,7 %

Massa específica aparente seca do corpo de prova: 1,57 g/cm<sup>3</sup>

pH da água: 6,2

Ambiente: temperatura: 21,6 °C umidade: 71 %

Utilização da guia de centralização: não

Tempo de imersão: 5 h

Observações durante o ensaio: (Tabela 18 e Gráfico 13)

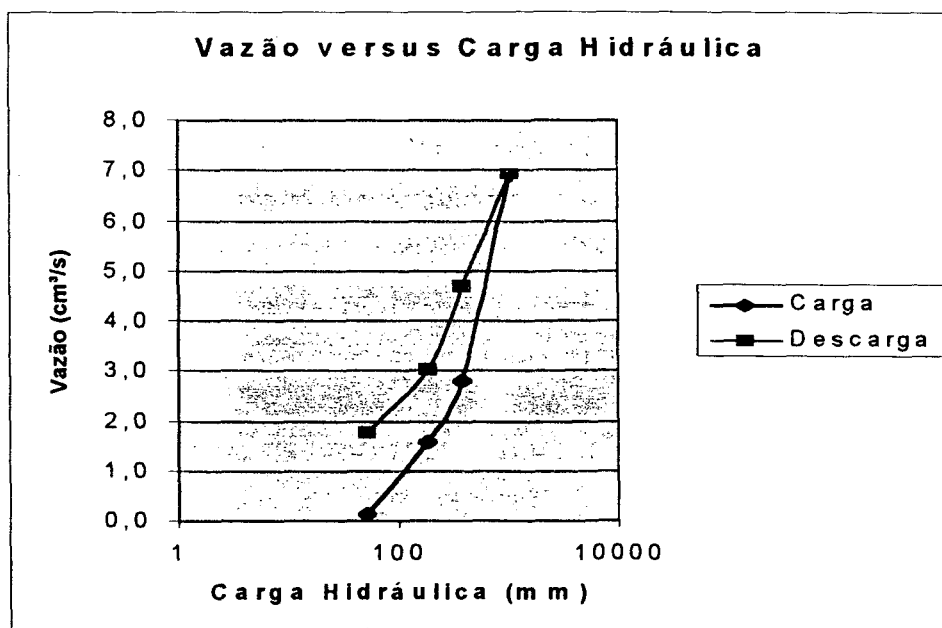
*Andamento do ensaio:* sem fluxo desde o início, reiniciado após o furo refeito

*Furo refeito:* sim

TABELA 18 - ENSAIO 5 DO FURO DE AGULHA, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA

CARGA HIDRÁULICA (mm)	VAZÃO DO EFLUENTE (cm <sup>3</sup> /s)	TURBIDEZ DO EFLUENTE
50	0,1	Escuro, passando a levemente escuro
180	1,6	Escuro, passando a levemente escuro
380	2,8	Escuro, passando a lev. escuro e claro
1020	6,9	Levemente escuro, passando a claro
380	4,7	Claro
180	3,0	Claro
50	1,7	Claro

GRÁFICO 13 - ENSAIO 5 DO FURO DE AGULHA, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA



*Observações após o ensaio:*

*Diâmetro final do furo:* impossível observar

*Umidade final do solo:* 27,5 %

*Classificação quanto à dispersividade:* duvidosa, podendo ser ND4

*Ensaio: 6*

*Observações prévias e iniciais:*

*Umidade inicial do solo (antes da imersão): 23,0 %*

*Massa específica aparente seca do corpo de prova: 1,54 g/cm<sup>3</sup>*

*pH da água: 6,2*

*Ambiente: temperatura: 21,8 °C      umidade: 67 %*

*Utilização da guia de centralização: não*

*Tempo de imersão: 5 h*

*Observações durante o ensaio: (Tabela 19)*

*Andamento do ensaio: sem fluxo no início, reiniciado após furo refeito e suspenso na carga hidráulica de 380 mm por excesso de vazão e vazamento*

*Furo refeito: sim*

**TABELA 19 - ENSAIO 6 DO FURO DE AGULHA, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA**

CARGA HIDRÁULICA (mm)	VAZÃO DO EFLUENTE (cm <sup>3</sup> /s)	TURBIDEZ DO EFLUENTE
50	2,5	Escuro, passando a levemente escuro
180	5,0	Levemente escuro, passando a claro
380	7,3	Escuro, passando a claro

*Observações após o ensaio:*

*Diâmetro final do furo: 2,5 a 3,5 mm no centro e 4,4 mm na saída*

*Umidade final do solo: não determinada*

*Classificação quanto à dispersividade: duvidosa, podendo ser D2*

*Ensaio: 7*

*Observações prévias e iniciais:*

*Umidade inicial do solo (antes da imersão): 22,0 %*

*Massa específica aparente seca do corpo de prova: 1,62 g/cm<sup>3</sup>*

*pH da água: 6,2*

*Ambiente: temperatura: 22,8 °C      umidade: 67 %*

*Utilização da guia de centralização: não*

*Tempo de imersão: 8 h*

Observações durante o ensaio: (Tabela 20)

Andamento do ensaio: fluxo interrompido na carga hidráulica 1020 mm e na descarga com 180 mm e 50mm

Furo refeito: sim

TABELA 20 - ENSAIO 7 DO FURO DE AGULHA, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA

CARGA HIDRÁULICA (mm)	VAZÃO DO EFLUENTE TE (cm <sup>3</sup> /s)	TURBIDEZ DO EFLUENTE
50	0,7	Escuro, passando a levemente escuro
180	0,7	Escuro, passando a lev. escuro e claro
380	2,1	Escuro, passando a lev. escuro e claro
1020	4,2	Levemente escuro, passando a claro
380	1,8	Claro
180	1,3	Claro
50	0,7	Claro

Observações após o ensaio:

Diâmetro final do furo: na entrada 3,0mm, impossível observar na saída

Umidade final do solo: 27,2 %

Classificação quanto à dispersividade: duvidosa, podendo ser ND4

b) resultados dos ensaios do solo arenoso:

b.1) Solo arenoso mantida a umidade de compactação:

Ensaio: 8

Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo (antes da imersão): 9,0 %

Massa específica aparente seca do corpo de prova: 1,84 g/cm<sup>3</sup>

pH da água: 6,1

Ambiente: temperatura: 22,6 °C umidade: 69 %

Utilização da guia de centralização: sim

Observações durante o ensaio: (Tabela 21 e Gráfico 14)

Andamento do ensaio: normal

Furo refeito: não



TABELA 21 - ENSAIO 8 DO FURO DE AGULHA, SOLO ARENOSO NA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO

CARGA HIDRÁULICA (mm)	VAZÃO DO EFLUENTE (cm <sup>3</sup> /s)	TURBIDEZ DO EFLUENTE
50	0,7	Escuro, passando a lev. escuro e claro
180	1,2	Claro
380	1,8	Claro
1020	3,2	Claro
380	1,9	Claro
180	1,2	Claro
50	0,7	Claro

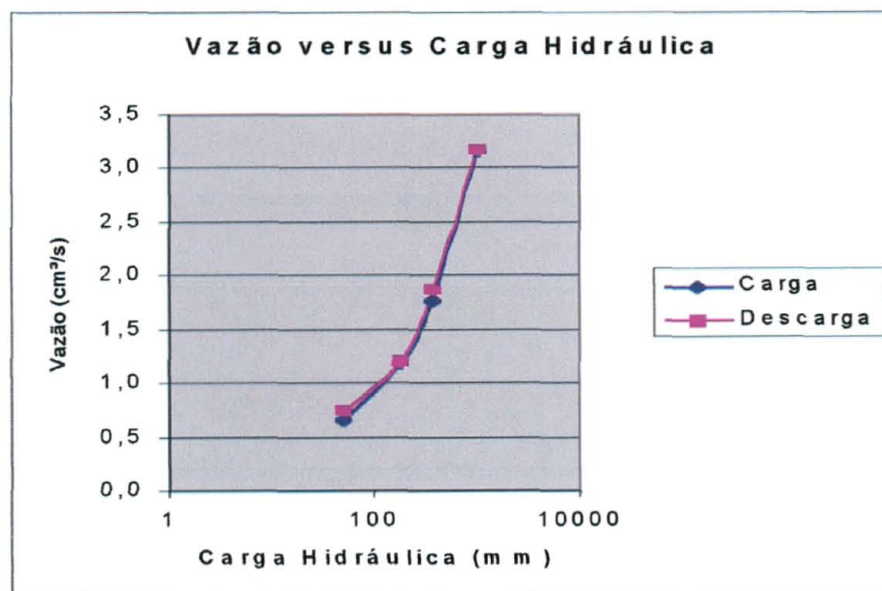
*Observações após o ensaio:*

*Diâmetro final do furo:* 3,0 mm na saída e 1,6 a 2,0 mm no restante

*Umidade final do solo:* 12,9 %

*Classificação quanto à dispersividade:* ND1

GRÁFICO 14 - ENSAIO 8 DO FURO DE AGULHA, SOLO ARENOSO NA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO



b.2) solo arenoso com imersão prévia:

*Ensaio:* 9

*Observações prévias e iniciais:*

*Umidade inicial do solo (antes da imersão):* 9,0 %

Massa específica aparente seca do corpo de prova: 1,84 g/cm<sup>3</sup>

pH da água: não verificado

Ambiente: temperatura: 21,6 °C umidade: 71 %

Utilização da guia de centralização: sim

Tempo de imersão: 4 h

Observações durante o ensaio: (Tabela 22 e Gráfico 15)

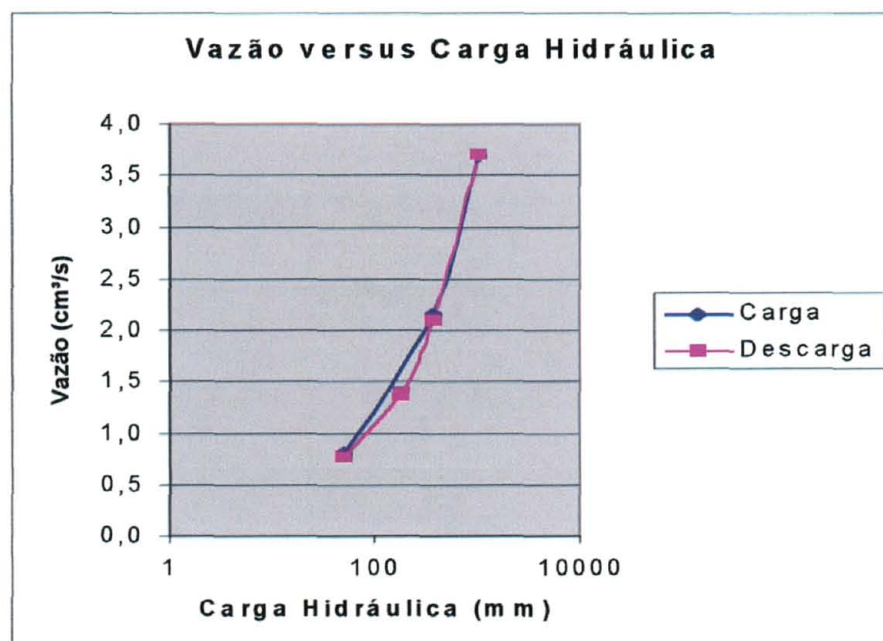
Andamento do ensaio: por erro operacional não foi aplicada a carga  
hidráulica de 180mm

Furo refeito: não

TABELA 22 - ENSAIO 9 DO FURO DE AGULHA, SOLO ARENOSO COM IMERSÃO PRÉVIA

CARGA HIDRÁULICA (mm)	VAZÃO DO EFLUEN- TE (cm <sup>3</sup> /s)	TURBIDEZ DO EFLUENTE
50	0,8	Levemente escuro, passando a claro
380	2,1	Claro
1020	3,7	Claro
380	2,1	Claro
180	1,4	Claro
50	0,8	Claro

GRÁFICO 15 - ENSAIO 9 DO FURO DE AGULHA, SOLO ARENOSO  
COM IMERSÃO PRÉVIA



Observações após o ensaio:

Diâmetro final do furo: 1,5 mm no centro e 2,2 mm na saída

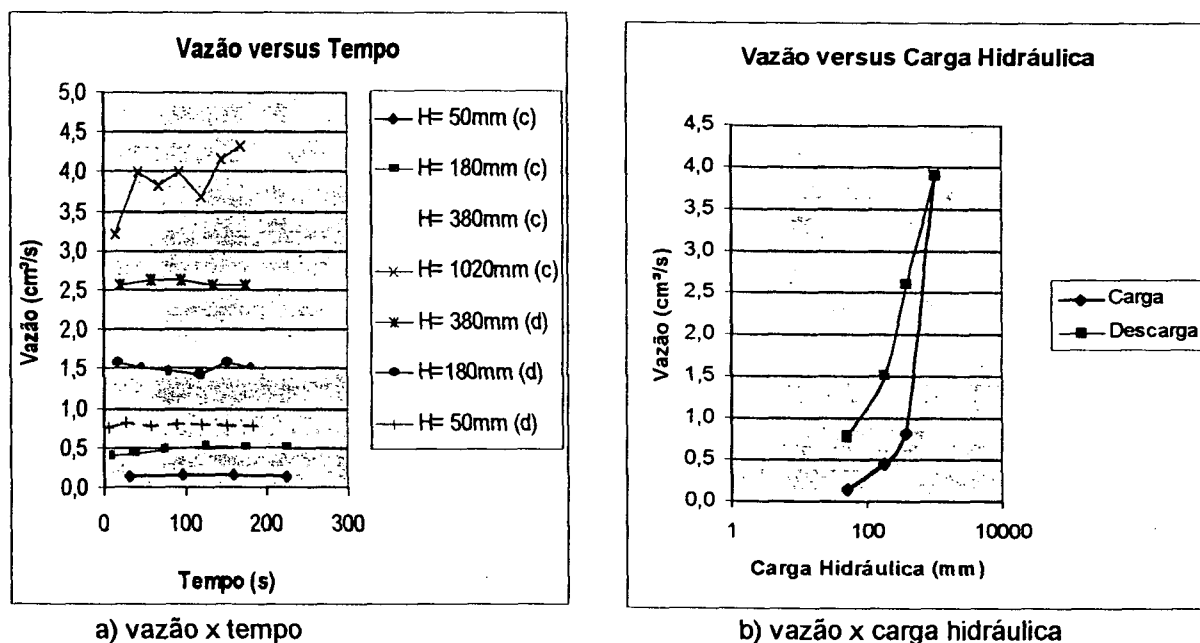
Umidade final do solo: 13,0 %

Classificação quanto à dispersividade: provavelmente ND1

c) discussão dos resultados:

Alguns gráficos complementares estão apresentados a seguir. Os pontos de todos os gráficos "vazão versus carga hidráulica" apresentados, na realidade são pontos médios de curvas "vazão versus tempo", traçadas para cada carga hidráulica do ensaio. Como um exemplo, os pontos da curva correspondente ao ensaio 2, anteriormente apresentado (Gráficos 11 e 16.b), foram obtidos das curvas "vazão versus tempo" (Gráfico 16.a).

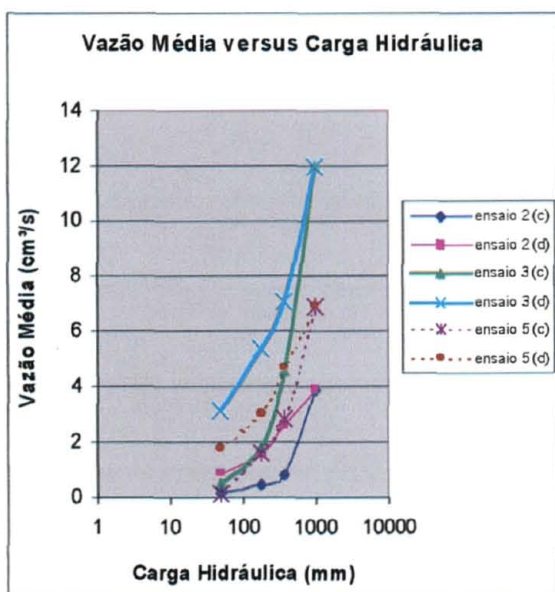
GRÁFICO 16 - ENSAIO 2 DO FURO DE AGULHA, ARGILA NA UMIDADE NATURAL, GRÁFICOS "VAZÃO VERSUS TEMPO" E "VAZÃO VERSUS CARGA HIDRÁULICA"



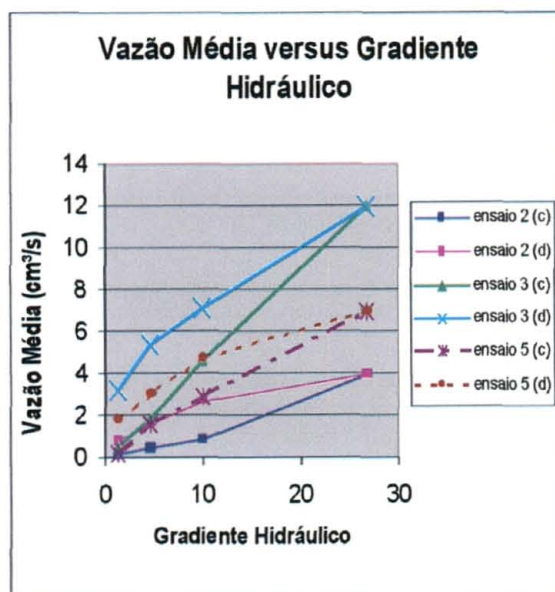
Os únicos resultados que puderam ser analisados sem dificuldades são os correspondentes aos ensaios 2 e 3 da argila, e 8 e 9 do solo arenoso. Os demais

apresentaram dificuldades durante sua realização, ou resultados duvidosos. Em diversos ensaios ocorreu redução de fluxo, contrariando as expectativas de aumento ou manutenção da vazão. Foi o caso do ensaio 1 (Gráfico 10), cuja curva de descarga tem pontos inferiores aos da carga. Em alguns casos o fluxo cessou completamente, ou nem sequer ocorreu desde o início do ensaio. Todos os ensaios em argila realizados com imersão prévia ou com secagem ao ar, e mesmo alguns na umidade natural, apresentaram redução ou interrupção do fluxo. Seguindo a recomendação da NBR 14114, nesses casos o aparelho foi desmontado e o corpo de prova perfurado novamente. Observou-se então uma tendência ao aumento da vazão, sugerindo que o novo furo pode ter provocado um aumento do diâmetro em relação ao previsto na metodologia, que é de 1,0 mm. No caso da argila esse fato pode ser explicado pela dificuldade em fixar a guia de centralização no solo rijo. Assim, as observações de efluente turvo e de elevadas vazões podem estar associadas mais com as sucessivas perfurações do corpo de prova, do que com a erosão e dispersão do solo. Por essas dificuldades não foram apresentados os gráficos de alguns dos ensaios realizados.

GRÁFICO 17 – ENSAIOS DO FURO DE AGULHA, COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS 2 E 3 (ARGILA NA UMIDADE NATURAL), E 5 (ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA)



a) vazão x carga hidráulica



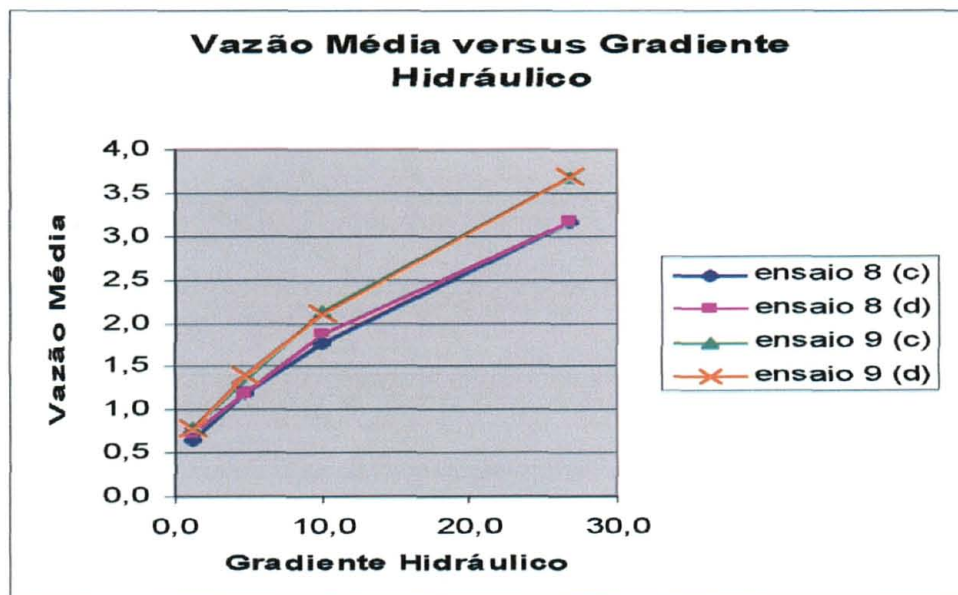
b) vazão x gradiente hidráulico



O Gráfico 17, no qual compararam-se os resultados dos ensaios 2 e 3, de argila na umidade natural, com o ensaio 5, de argila submetida a imersão prévia, pode ser uma confirmação desse aspecto. Conforme a expectativa o ensaio 5 apresentou vazão máxima maior que o ensaio 2. Porém o ensaio 3, com perfuração repetida, apesar de não ter sido submetido a imersão apresentou vazão máxima maior que os outros dois.

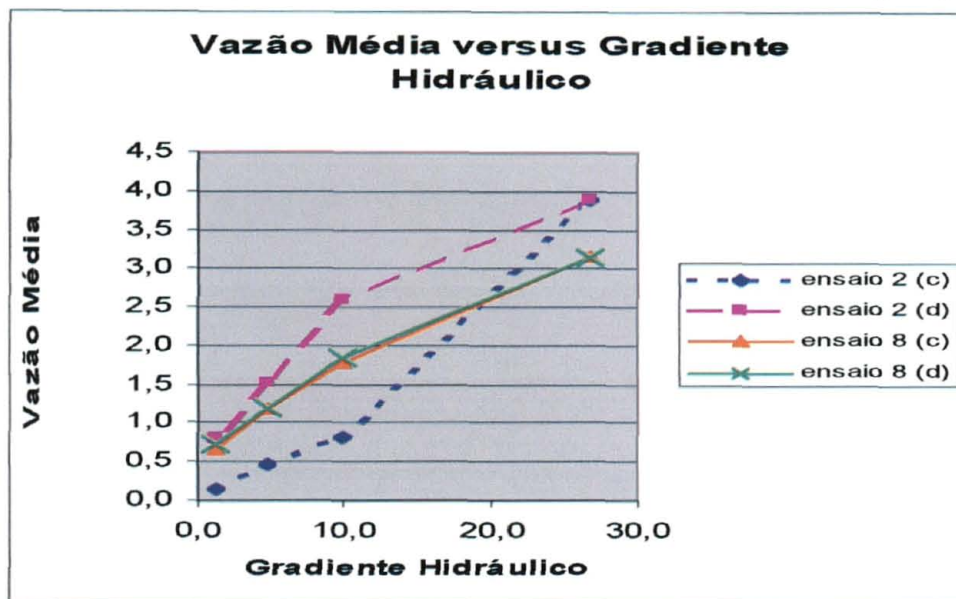
O Gráfico 18, comparando os resultados dos dois ensaios do solo arenoso, indica que não ocorreram diferenças entre carga e descarga, indicando material não erodível em presença de água. A vazão máxima no ensaio realizado com umidade inicial igual a ótima (8), foi menor que no ensaio com imersão prévia do corpo de prova (9).

GRÁFICO 18 – ENSAIOS DO FURO DE AGULHA, COMPARAÇÃO DO SOLO ARENOSO NA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO (8) E COM IMERSÃO PRÉVIA (9)



Compararam-se os resultados dos ensaios em argila na umidade natural e em solo arenoso na umidade de compactação, ambos realizados sem necessidade de perfurações sucessivas. A argila apresentou tendência à erosão e o solo arenoso não, conforme indicam a comparação de vazões para as mesmas cargas hidráulicas e as diferenças entre a curva de descarga e de carga para cada solo.

GRÁFICO 19 – ENSAIOS DO FURO DE AGULHA, COMPARAÇÃO DA ARGILA NA UMIDADE NATURAL (2) E SOLO ARENOSO NA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO (8)



As classificações da argila são duvidosas em quase todos os ensaios realizados. O solo arenoso mostrou-se nitidamente não dispersivo (ND1), contrariando resultados de alguns dos outros métodos anteriormente apresentados.

## 7.8 ENSAIO INDERBITZEN

O programa de ensaios Inderbitzen foi constituído por 10 testes, sendo dois com o solo arenoso (Amostra 2) e os demais com a argila (Amostra 1). Os corpos de prova de argila eram indeformados, coletados nos próprios anéis metálicos que os confinam durante o ensaio, e os de solo arenoso compactados na umidade ótima nos anéis de PVC usados no ensaio.

Do programa constaram ensaios da argila com umidade inicial natural (Ensaio 1 e 2), com umidade inicial higroscópica após secagem ao ar da amostra contida no anel (Ensaio 3 a 5) e com imersão prévia em água também confinada no anel (Ensaio 6 e 7). As duas partes do ensaio 8 constituem uma proposta de teste prolongado realizado com a argila, no qual o mesmo corpo de prova foi submetido a ensaio com umidade

inicial natural e, após secagem ao ar, na umidade higroscópica. Buscou-se eliminar a heterogeneidade do solo para comparar seu comportamento em dois estados diversos, bem como reproduzir em laboratório um processo que ocorre nos ciclos naturais de secagem e umedecimento.

Os ensaios do solo arenoso testaram o solo mantido na umidade ótima (Ensaio 9) e após secagem ao ar (Ensaio 10).

As condições que caracterizam os ensaios foram, tanto quanto possível, mantidas constantes:

- inclinação da rampa de 34° em relação à horizontal;
- vazão média em torno de 73,0 ml/s, que corresponde a cerca de 4,4 l / min;
- duração programada de 20 min, tendo sido prolongada quando ainda não tinha ocorrido a estabilização da erosão.

Para cada ensaio são apresentados a seguir seus dados e observações, bem como os resultados através dos gráficos “perda de solo acumulada *versus* tempo de ensaio”, e “velocidade de perda de solo *versus* tempo de ensaio”. Propõe-se a inclusão da porcentagem da perda de solo em relação ao peso inicial total do corpo de prova, a exemplo do que é apresentado pelo autor do método Inderbitzen Modificado (FREIRE, 2001; FREIRE e GALVÃO, 2002) apresentado no item 7.9. Diversos parâmetros estão incluídos na apresentação de cada ensaio, de modo a permitir eventuais aplicações e comparações com outros trabalhos. A velocidade de erosão entre 0 e 5 min do ensaio é utilizada em diversas pesquisas (BRASIL, 1979; FONSECA e FERREIRA, 1981; FÁCIO, 1991; LEMOS, 2002). A metodologia de classificação da suscetibilidade do solo à erosão proposta por Bastos (1999), envolve o gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio, por isso incluído também entre os resultados. O valor médio da sucção determinada em laboratório pelo método do papel filtro, foi incluído em cada resumo de ensaio.

a) resultados dos ensaios da argila:

a.1) argila na umidade inicial natural:

*Ensaio: 1*

*Observações prévias e iniciais:*



Umidade inicial do solo: 23,5 %

Sucção média: 2533,54 kPa

Massa específica aparente do solo úmido: 1,88 g/cm<sup>3</sup>

Massa específica aparente do solo seco: 1,526 g/cm<sup>3</sup>

Utilização da massa de calafetar: não

Controle prévio da vazão: 72,0 ml/s

Observações durante o ensaio: (Gráfico 20)

Controle da vazão no ensaio: 71,3 ml/s

Andamento do ensaio: normal

Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 20 min

Perda total de solo no ensaio: 0,217 g/cm<sup>2</sup>

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: 2,68 %

Máxima velocidade de erosão medida: 1,69 g/cm<sup>2</sup>/h

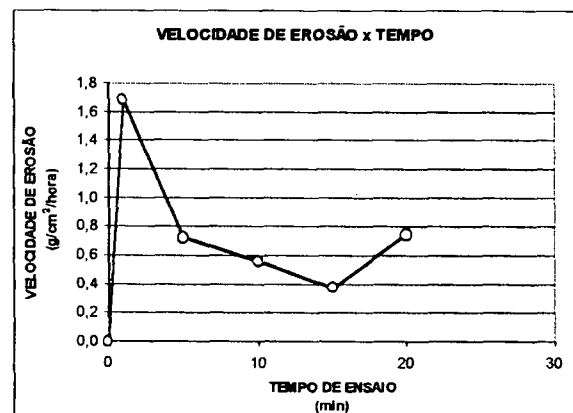
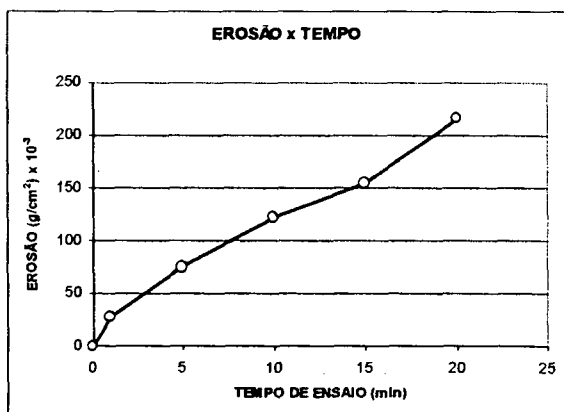
Intervalo da medição da máxima velocidade: 0 a 1 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio: 0,92 g/cm<sup>2</sup>/h

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio: 0,012 g/cm<sup>2</sup>/min

Umidade final do solo: 27,7 %

GRÁFICO 20 – ENSAIO 1 INDERBITZEN, ARGILA NA UMIDADE NATURAL



## Ensaio: 2

### Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo: 23,4 %

Sucção média: 2533,54 kPa

Massa específica aparente do solo úmido: não determinado

Massa específica aparente do solo seco: não determinado

Utilização da massa de calafetar: não      Controle prévio da vazão: 74,6 ml/s

### Observações durante o ensaio: (Gráfico 21)

Controle da vazão no ensaio: 71,7 ml/s

Andamento do ensaio: normal

### Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 20 min

Perda total de solo no ensaio: 0,309 g/cm<sup>2</sup>

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: não determinado

Máxima velocidade de erosão medida: 1,65 g/cm<sup>2</sup>/h

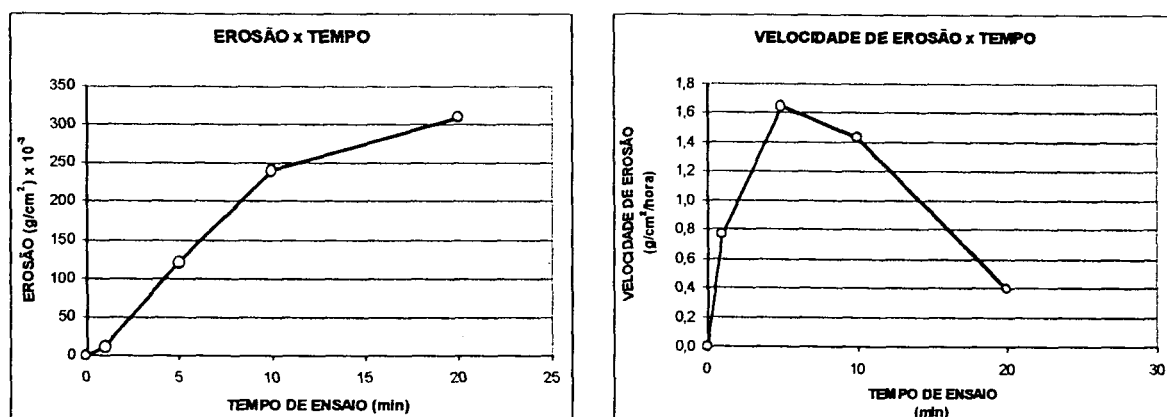
Intervalo da medição da máxima velocidade: 1 a 5 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio: 1,47 g/cm<sup>2</sup>/h

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio: 0,024 g/cm<sup>2</sup>/min

Umidade final do solo: 27,6 %

GRÁFICO 21 – ENSAIO 2 INDERBITZEN, ARGILA NA UMIDADE NATURAL



a.2) Argila na umidade inicial higroscópica

Ensaio: 3

Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo: 9,9 %

Sucção média: 25082,66 kPa

Massa específica aparente do solo úmido:  $1,375 \text{ g/cm}^3$

Massa específica aparente do solo seco:  $1,251 \text{ g/cm}^3$

Utilização da massa de calafetar: sim    Controle prévio da vazão: 72,6 ml/s

Observações durante o ensaio: (Gráfico 22)

Controle da vazão no ensaio: 73,0 ml/s

Andamento do ensaio: grande erosão, formação de sulcos e buracos

Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 20 min

Perda total de solo no ensaio:  $3,842 \text{ g/cm}^2$

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: 72,49 %

Máxima velocidade de erosão medida:  $25,58 \text{ g/cm}^2/\text{h}$

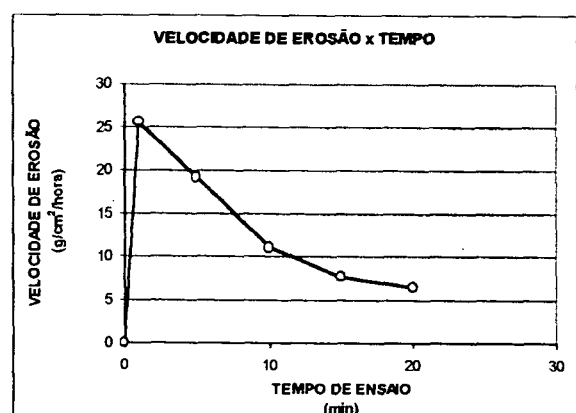
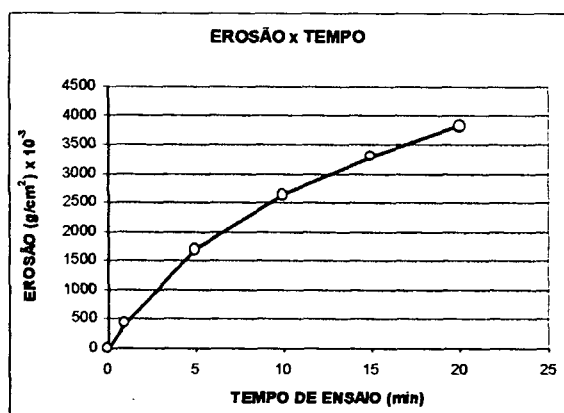
Intervalo da medição da máxima velocidade: 0 a 1 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio:  $20,59 \text{ g/cm}^2/\text{h}$

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio:  $0,265 \text{ g/cm}^2/\text{min}$

Umidade final do solo: não determinado

GRÁFICO 22 – ENSAIO 3 INDERBITZEN, ARGILA NA UMIDADE HIGROSCÓPICA



Ensaio: 4

Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo: 9,9 %

Sucção média: 25082,66 kPa

Massa específica aparente do solo úmido: 1,507 g/cm<sup>3</sup>

Massa específica aparente do solo seco: 1,371 g/cm<sup>3</sup>

Utilização da massa de calafetar: sim    Controle prévio da vazão: 72,5 ml/s

Observações durante o ensaio: (Gráfico 23)

Controle da vazão no ensaio: 72,2 ml/s

Andamento do ensaio: grande erosão, formação de sulcos e buracos

Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 20 min

Perda total de solo no ensaio: 3,676 g/cm<sup>2</sup>

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: 50,59 %

Máxima velocidade de erosão medida: 16,33 g/cm<sup>2</sup>/h

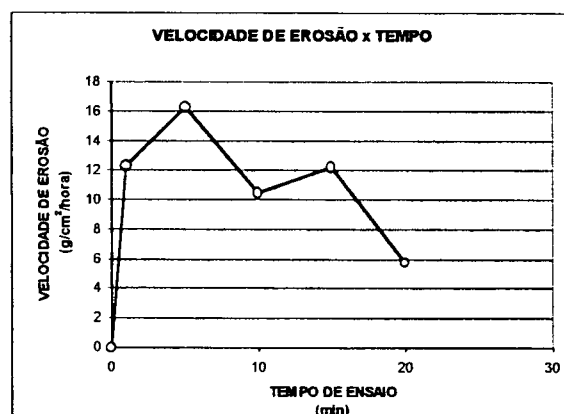
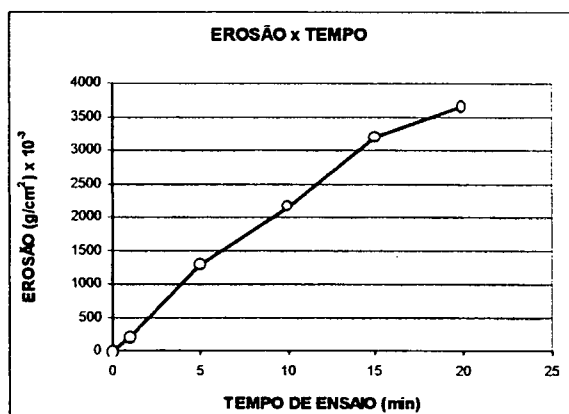
Intervalo da medição da máxima velocidade: 1 a 5 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio: 15,54 g/cm<sup>2</sup>/h

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio: 0,217 g/cm<sup>2</sup>/min

Umidade final do solo: não determinada

GRÁFICO 23 – ENSAIO 4 INDERBITZEN, ARGILA NA UMIDADE HIGROSCÓPICA



Ensaio: 5

Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo: 9,9 %

Sucção média: 25082,66 kPa

Massa específica aparente do solo úmido: não determinado

Massa específica aparente do solo seco: não determinado

Utilização da massa de calafetar: sim    Controle prévio da vazão: 72,1 ml/s

Observações durante o ensaio: (Gráfico 24)

Controle da vazão no ensaio: 72,3 ml/s

Andamento do ensaio: grande erosão, formação de sulcos e buracos

Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 20 min

Perda total de solo no ensaio: 2,267 g/cm<sup>2</sup>

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: não determinado

Máxima velocidade de erosão medida: 17,56 g/cm<sup>2</sup>/h

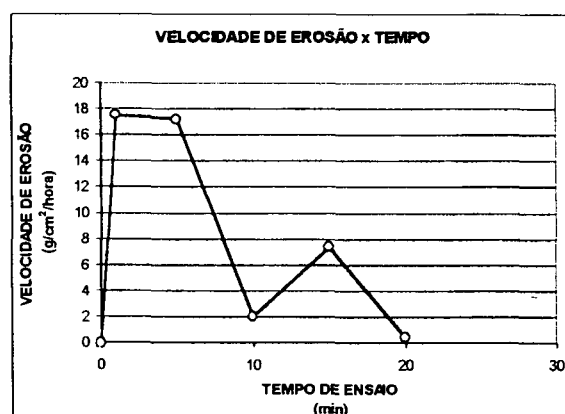
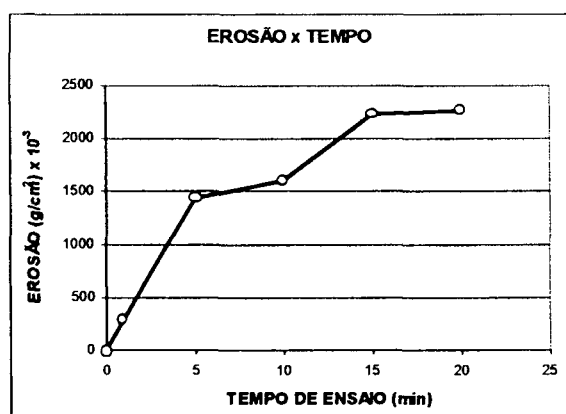
Intervalo da medição da máxima velocidade: 0 a 1 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio: 17,28 g/cm<sup>2</sup>/h

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio: 0,161 g/cm<sup>2</sup>/min

Umidade final do solo: 22,7 %

GRÁFICO 24 – ENSAIO 5 INDERBITZEN, ARGILA NA UMIDADE HIGROSCÓPICA



a.3) argila com imersão prévia:

Ensaio: 6

Observações prévias e iniciais:

Tempo de imersão: cerca de 2 dias

Umidade inicial do solo (após a imersão): 30,1 %

Massa específica aparente do solo úmido:  $1,422 \text{ g/cm}^3$

Massa específica aparente do solo seco:  $1,093 \text{ g/cm}^3$

Utilização da massa de calafetar: não

Controle prévio da vazão: 69,5 ml/s

Observações durante o ensaio: (Gráfico 25)

Controle da vazão no ensaio: 69,4 ml/s

Andamento do ensaio: normal

Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 20 min

Perda total de solo no ensaio:  $0,043 \text{ g/cm}^2$

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: 0,74 %

Máxima velocidade de erosão medida:  $1,07 \text{ g/cm}^2/\text{h}$

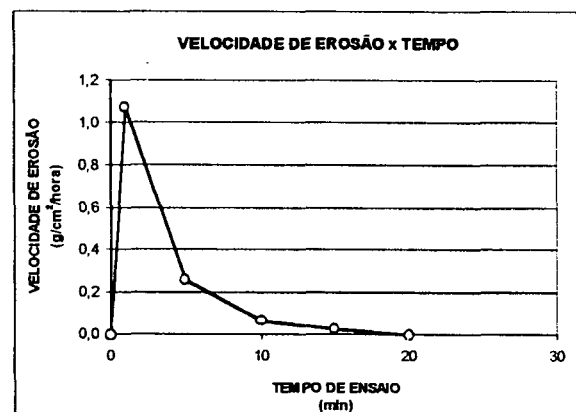
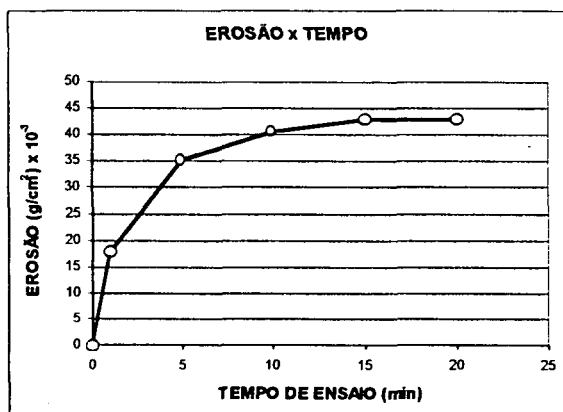
Intervalo da medição da máxima velocidade: 0 a 1 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio:  $0,423 \text{ g/cm}^2/\text{h}$

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio:  $0,004 \text{ g/cm}^2/\text{min}$

Umidade final do solo: 30,3 %

GRÁFICO 25 – ENSAIO 6 INDERBITZEN, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA



Ensaio: 7

Observações prévias e iniciais:

Tempo de imersão: cerca de 2 dias

Umidade inicial do solo (após a imersão): 28,1 %

Massa específica aparente do solo úmido: 1,546 g/cm<sup>3</sup>

Massa específica aparente do solo seco: 1,207 g/cm<sup>3</sup>

Utilização da massa de calafetar: não

Controle prévio da vazão: 73,3 ml/s

Observações durante o ensaio: (Gráfico 26)

Controle da vazão no ensaio: 70,2 ml/s

Andamento do ensaio: normal

Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 60 min

Perda total de solo no ensaio: 0,004 g/cm<sup>2</sup>

Perda de solo em 20 min de ensaio: 0,003 g/cm<sup>2</sup>

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: 0,05 %

Porcentagem de perda de solo em 20 min: 0,05 %

Máxima velocidade de erosão medida: 0,15 g/cm<sup>2</sup>/h

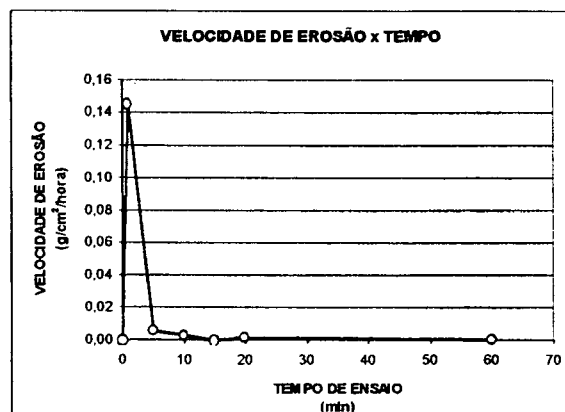
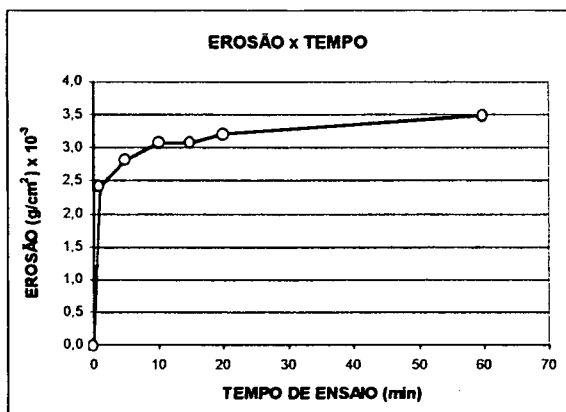
Intervalo da medição da máxima velocidade: 0 a 1 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio: 0,034 g/cm<sup>2</sup>/h

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio: 0,0003 g/cm<sup>2</sup>/min

Umidade final do solo: 27,7 %

GRÁFICO 26 – ENSAIO 7 INDERBITZEN, ARGILA COM IMERSÃO PRÉVIA





a.4) ensaio prolongado da argila, na umidade inicial natural (1ª parte) e secagem ao ar até a umidade higroscópica (2ª parte)

Ensaio: 8 / 1ª parte

Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo: 24,2 %

Sucção média: 2533,54 kPa

Massa específica aparente do solo úmido: não determinada

Massa específica aparente do solo seco: não determinada

Utilização da massa de calafetar: não      Controle prévio da vazão: 72,4 ml/s

Observações durante o ensaio: (Gráfico 27)

Controle da vazão no ensaio: 72,4 ml/s

Andamento do ensaio: normal

Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 20 min

Perda total de solo no ensaio: 0,257 g/cm<sup>2</sup>

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: não determinada

Máxima velocidade de erosão medida: 4,20 g/cm<sup>2</sup>/h

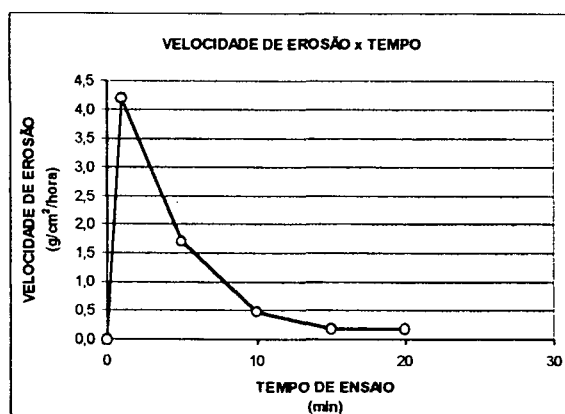
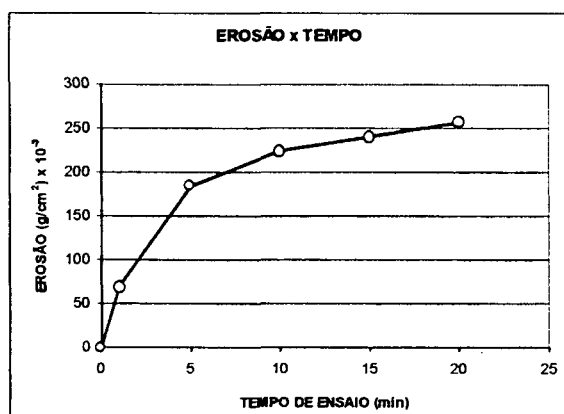
Intervalo da medição da máxima velocidade: 0 a 1 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio: 2,21 g/cm<sup>2</sup>/h

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio: 0,022 g/cm<sup>2</sup>/min

Umidade final do solo: não determinada

GRÁFICO 27 – ENSAIO 8 INDERBITZEN PROLONGADO, 1ª PARTE, ARGILA NA UMIDADE NATURAL



Ensaio: 8 / 2ª parte

Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo: não determinada; estimada em 9,9%

Sucção média: 25082,66 kPa

Massa específica aparente do solo úmido: não determinada

Massa específica aparente do solo seco: não determinada

Utilização da massa de calafetar: sim      Controle prévio da vazão: 71,9 ml/s

Observações durante o ensaio: (Gráfico 28)

Controle da vazão no ensaio: 72,3 ml/s

Andamento do ensaio: grande erosão, com formação de sulcos e buracos

Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 20 min

Perda total de solo no ensaio: 1,697 g/cm<sup>2</sup>

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: não determinada

Máxima velocidade de erosão medida: 11,95 g/cm<sup>2</sup>/h

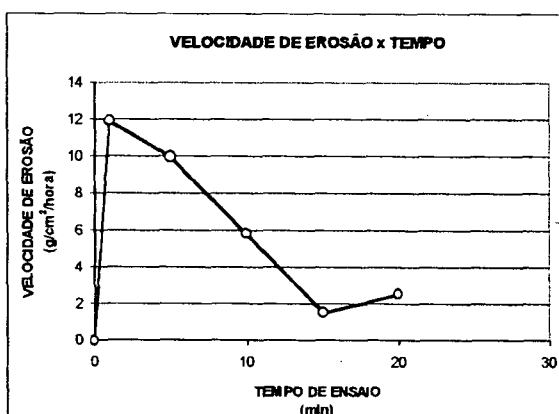
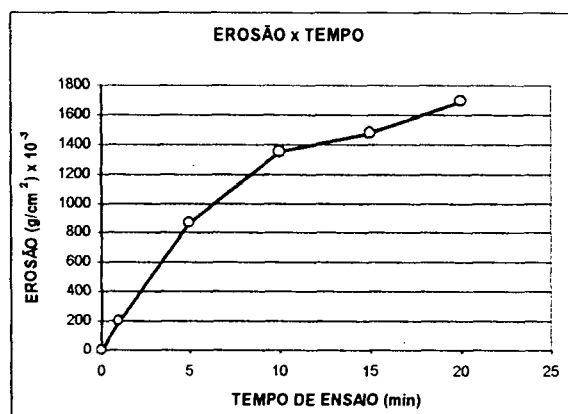
Intervalo da medição da máxima velocidade: 0 a 1 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio: 10,41 g/cm<sup>2</sup>/h

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio: 0,135 g/cm<sup>2</sup>/min

Umidade final do solo: 31,7 %

GRÁFICO 28 – ENSAIO 8 INDERBITZEN PROLONGADO, 2ª PARTE, ARGILA NA UMIDADE HIGROSCÓPICA



b) resultados dos ensaios do solo arenoso:

b.1) solo arenoso na umidade inicial ótima:

Ensaio: 9

Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo: 10,1 %

Sucção média: 1681,95 kPa

Massa específica aparente do solo úmido: 1,332 g/cm<sup>3</sup>

Massa específica aparente do solo seco: 1,209 g/cm<sup>3</sup>

Utilização da massa de calafetar: não      Controle prévio da vazão: 71,7 ml/s

Observações durante o ensaio: (Gráfico 29)

Controle da vazão no ensaio: 72,0 ml/s      Andamento do ensaio: normal

Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 100 min      Perda total de solo no ensaio: 0,420 g/cm<sup>2</sup>

Perda de solo em 20 min de ensaio: 0,130 g/cm<sup>2</sup>

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: 6,96 %

Porcentagem de perda de solo em 20 min: 2,15 %

Máxima velocidade de erosão medida: 0,52 g/cm<sup>2</sup>/h

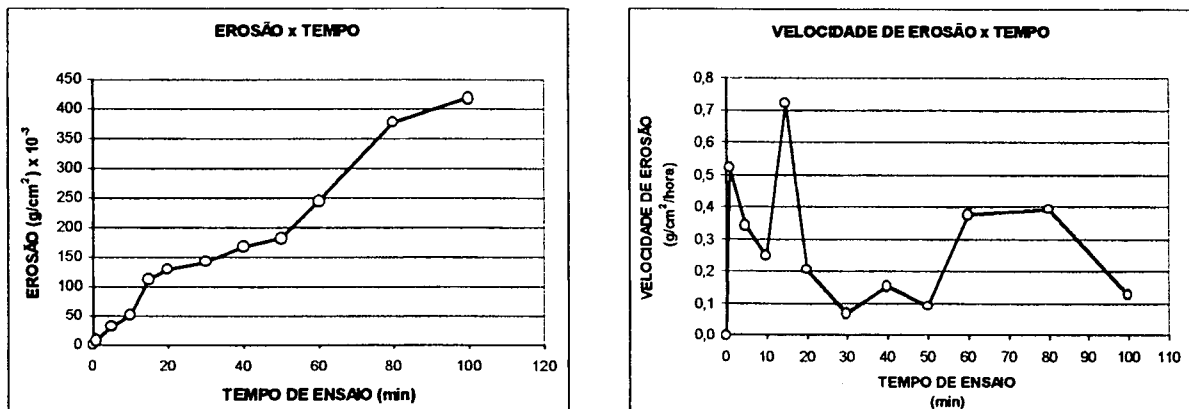
Intervalo da medição da máxima velocidade: 0 a 1 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio: 0,380 g/cm<sup>2</sup>/h

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio: 0,005 g/cm<sup>2</sup>/min

Umidade final do solo: 11,5 %

GRÁFICO 29 – ENSAIO 9 INDERBITZEN, SOLO ARENOSO NA UMIDADE ÓTIMA



b.2) solo arenoso na umidade inicial higroscópica

Ensaio: 10

Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo: 0,9 %

Sucção média: 24148,69 kPa

Massa específica aparente do solo úmido: 1,367 g/cm<sup>3</sup>

Massa específica aparente do solo seco: 1,355 g/cm<sup>3</sup>

Utilização da massa de calafetar: não

Controle prévio da vazão: 71,9 ml/s

Observações durante o ensaio: (Gráfico 30)

Controle da vazão no ensaio: 76,4 ml/s

Andamento do ensaio: normal

Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 80 min

Perda total de solo no ensaio: 0,513 g/cm<sup>2</sup>

Perda de solo em 20 min de ensaio: 0,243 g/cm<sup>2</sup>

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: 7,58 %

Porcentagem de perda de solo em 20 min: 3,59 %

Máxima velocidade de erosão medida: 1,14 g/cm<sup>2</sup>/h

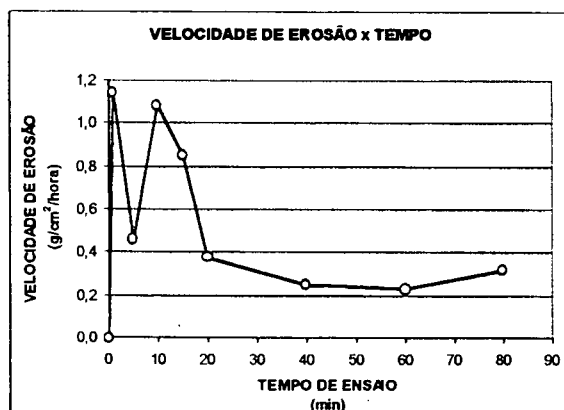
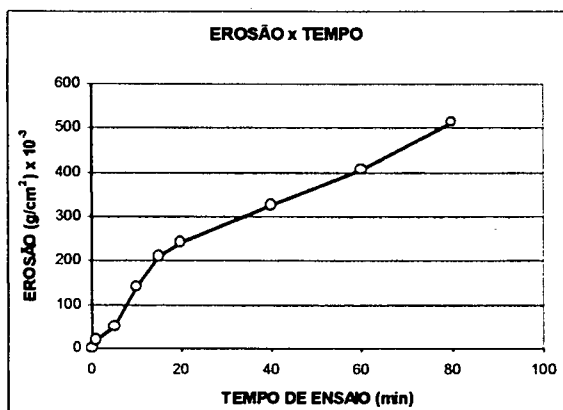
Intervalo da medição da máxima velocidade: 0 a 1 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio: 0,602 g/cm<sup>2</sup>/h

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio: 0,014 g/cm<sup>2</sup>/min

Umidade final do solo: 9,4 %

GRÁFICO 30 – ENSAIO 10 INDERBITZEN, SOLO ARENOSO NA UMIDADE HIGROSCÓPICA



c) discussão dos resultados:

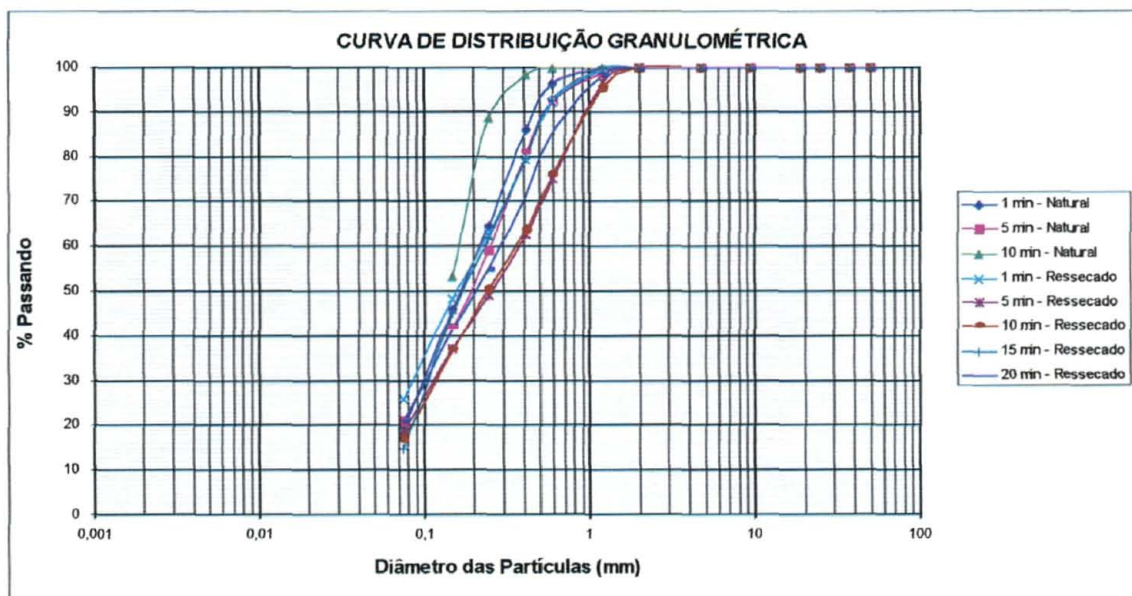
Entre as análises incluídas na metodologia, o ensaio Inderbitzen foi o que forneceu os melhores resultados para os materiais estudados, permitindo avaliar a suscetibilidade à erosão através da comparação do comportamento entre diferentes materiais, bem como do mesmo solo em diferentes estados, além de simulações de processos naturais.

Os resultados de alguns ensaios, especialmente do solo arenoso compactado (Gráficos 29 e 30), indicam que a erosão e sua velocidade nem sempre aumentaram ou diminuíram de maneira homogênea e regular. Pedacos mais ou menos resistentes dos corpos de prova, foram os responsáveis por esse comportamento. Nos corpos de prova compactados ocorreram freqüentes remoções de partículas agregadas na forma de placas maiores, provocando variações nos resultados. Os contatos entre camadas compactadas, no caso do solo arenoso, e as superfícies de ruptura naturais, características da argila rija estudada, também podem estar associados a essas variações.

Uma análise complementar possível no ensaio Inderbitzen, é a da granulometria do material erodido. A título de exemplo foi selecionado o ensaio 8 da argila, pois envolve o material tanto na umidade natural (1ª parte), como na umidade higroscópica (2ª parte). O material retido na peneira de 0,054 mm em cada intervalo, foi submetido à secagem em estufa para obtenção dos valores de perda unitária por erosão, velocidade de erosão e porcentagem de perda. Em seguida foi destorroado e submetido a um ensaio de granulometria por peneiramento e, com os resultados traçada uma curva granulométrica. O conjunto de curvas correspondentes a todos os intervalos da 1ª e da 2ª parte, está apresentado a seguir (Gráfico 31). Apesar da semelhança entre as curvas, elas diferem entre si, mesmo tratando-se de um único corpo de prova ao longo de todo o ensaio. É difícil caracterizar um padrão de variação da granulometria do solo erodido, em função do tempo de ensaio. Porém ficou caracterizada a tendência de perda de partículas menores na parte realizada com o solo na umidade natural, e de partículas maiores na umidade higroscópica. Comparando esse conjunto de curvas com a da granulometria convencional realizada com a argila preparada por via seca (Gráfico

1), observa-se que na granulometria do material erodido predominam partículas mais grossas. Tal observação permitiria supor um efeito de seleção natural do processo, através do qual as partículas mais grossas seriam mais suscetíveis à erosão. Porém, trata-se provavelmente do efeito da forma de preparação diferente das amostras nos dois ensaios, utilizando-se defloculante apenas na preparação da amostra da granulometria convencional. Ou seja, nas curvas granulométricas do ensaio Inderbitzen o solo estaria menos destorroado. Embora sejam comuns os relatos citando a análise granulométrica do material erodido como uma das etapas do ensaio Inderbitzen, é rara a apresentação desses resultados. Freire e Galvão (2002) apresentam um gráfico comparando a curva granulométrica de material erodido e a granulometria do mesmo solo antes do Inderbitzen Modificado, ensaio que é o objeto do item 7.9. Os autores destacam o paralelismo entre as duas curvas, e a observação de granulometria mais fina do material erodido, contrariando os resultados obtidos.

GRÁFICO 31 – ENSAIO 10 Inderbitzen Prolongado, Granulometria do Material Erodido, Argila na Umidade Natural (1ª P.) e na Umidade Higroscópica (2ª P.)



Os resultados confirmaram a importância de incluir a etapa de observação a 1 min do início do ensaio. Devido à elevada velocidade de erosão no início do ensaio, praticamente todas as curvas de velocidade de erosão tem seu formato influenciado

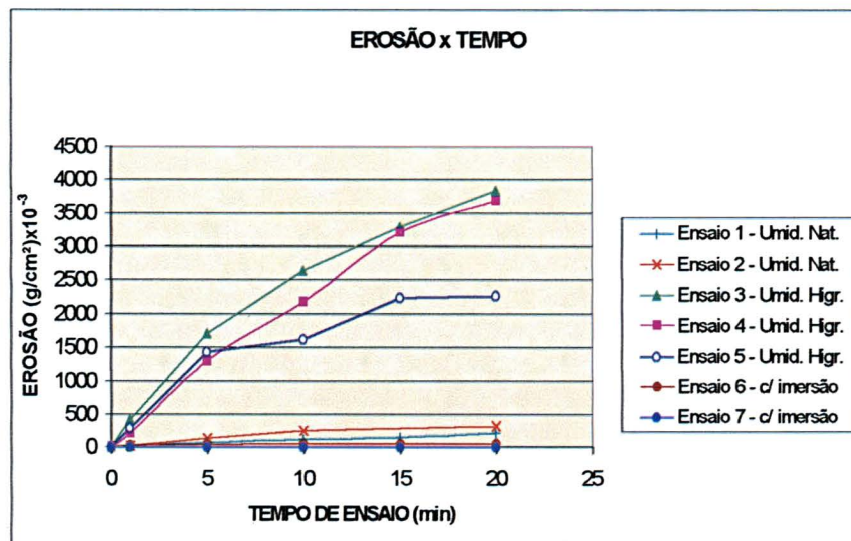
pelos valores obtidos após 1 min. Diversos autores destacam que a erosão mais significativa ocorre nos 5 min iniciais de ensaio, conforme citado anteriormente. Trata-se, provavelmente, do efeito dinâmico da primeira onda de fluxo (BASTOS, 1999), citada no Capítulo 2.

Verificou-se também que a determinação da porcentagem de perda total, é uma forma simples e direta de avaliar e comparar resultados de ensaios. Proposta para o ensaio Inderbitzen Modificado (FREIRE, 2001), merece ser incluída na prática do ensaio Inderbitzen. É determinada através da razão, expressa em porcentagem, entre o peso total acumulado de solo erodido seco em estufa e o peso seco total do corpo de prova antes do ensaio. O peso seco do corpo de prova é obtido através do peso do corpo de prova contido no anel, descontado do peso do anel e corrigido em função da umidade inicial do solo.

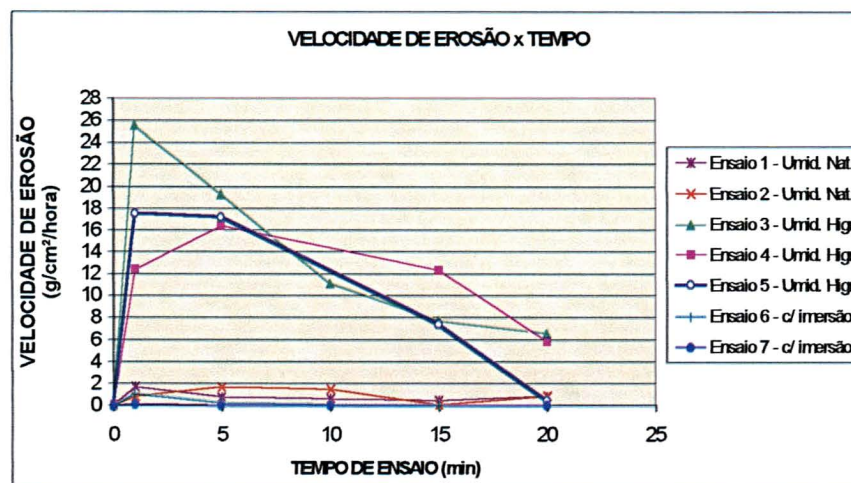
Apresenta-se uma comparação entre resultados de diversos ensaios da argila (Gráfico 32). As perdas de solo (Gráfico 32.a) e as velocidades de erosão (Gráfico 32.b) apresentaram grandes variações em função da umidade inicial do solo. Os corpos de prova com elevada umidade, submetidos a imersão em água, apresentaram as menores perdas acumuladas, inferiores a  $0,04 \text{ g/cm}^2$ , bem como as mais baixas velocidades máximas, inferiores a  $1,1 \text{ g/cm}^2/\text{h}$ . Na umidade natural a perda acumulada foi da ordem de  $0,25 \text{ g/cm}^2$ , e a velocidade máxima de  $1,7 \text{ g/cm}^2/\text{h}$ . É possível que as diferenças estejam associadas a pequenas perdas de umidade que possam ter ocorrido com o material, desde a sua coleta até o ensaio. O comportamento modificou-se completamente nos corpos de prova submetidos a secagem ao ar. A perda total acumulada passou a ser da ordem de  $20,0 \text{ g/cm}^2$ , e a velocidade máxima de  $3,0 \text{ g/cm}^2/\text{h}$ . A porcentagem de perda total indica claramente essas diferenças. Para os ensaios com a argila submetida à imersão prévia a perda total foi inferior a 1%, na umidade natural foi pouco inferior a 3%, e na umidade higroscópica passou a ser da ordem de 50 a 70%. Observou-se que o solo ressecado, apresentando contração, fraturamento e “empastilhamento”, tornou-se altamente suscetível a erosão quando hidratado novamente.



GRÁFICO 32 - ENSAIO INDERBITZEN, COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS 1 A 7 DA ARGILA



a) Comparação entre as curvas “erosão x tempo”, até 20 minutos de ensaio

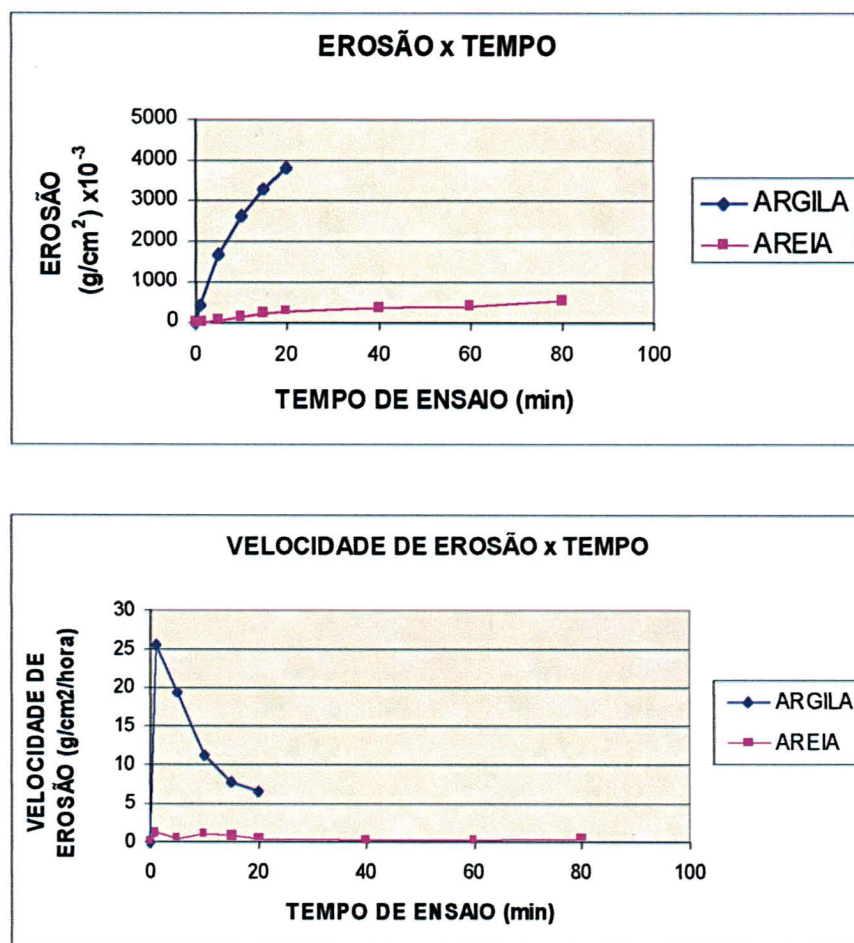


b) Comparação entre as curvas “velocidade de erosão x tempo”, até 20 minutos de ensaio

Convém destacar que a erosão excessiva que ocorre nos ensaios com corpos de prova da argila na umidade inicial higroscópica, pode descaracterizar o ensaio e dificultar comparações (BASTOS, 1999) devido a formação de sulcos e buracos. Altera-se a superfície de escoamento da água e a ação erosiva do fluxo. Porém, é uma boa simulação de eventos erosivos que ocorrem na natureza.

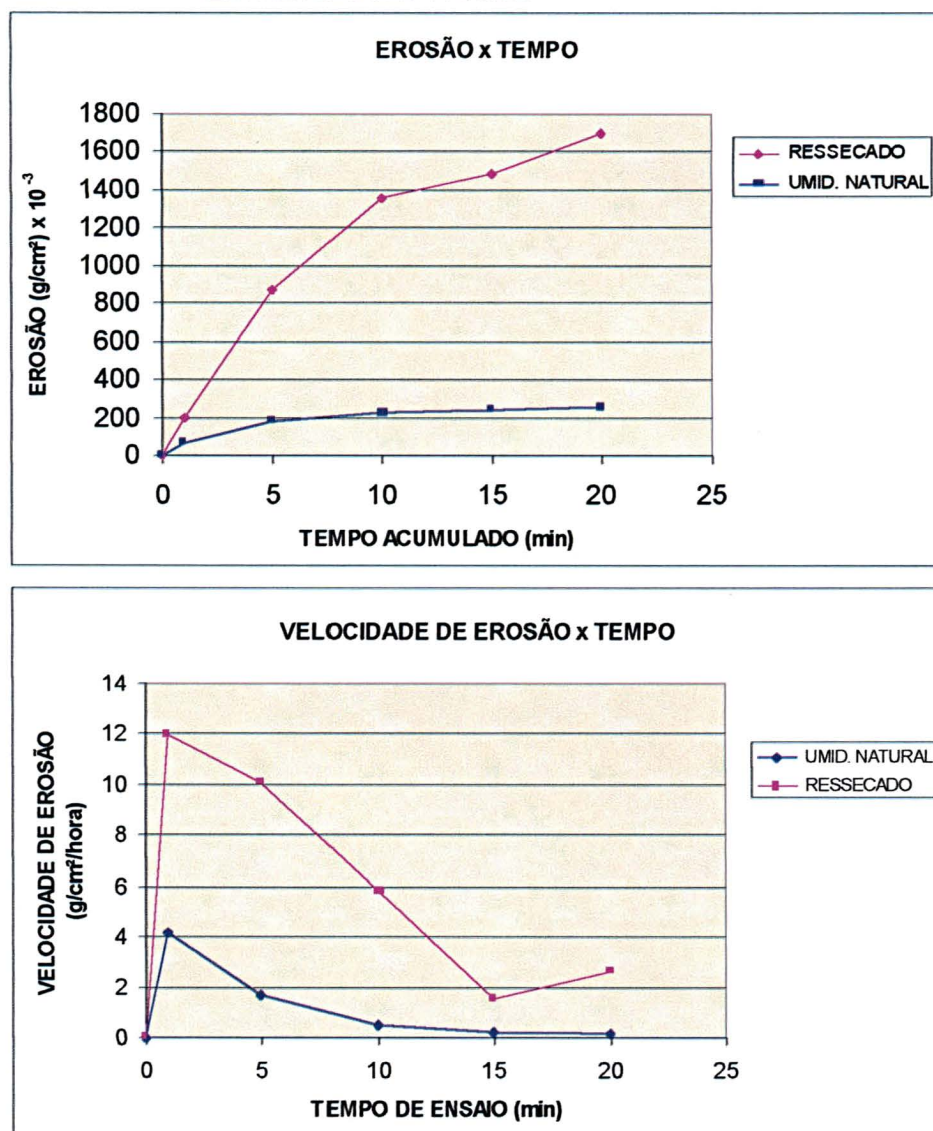
No Gráfico 33 comparam-se os resultados do ensaio 3 da argila e 10 do solo arenoso, ambos com corpos de prova na umidade higroscópica após secagem ao ar. Comparando argila e solo arenoso, respectivamente, vem: erosão total acumulada de 3,84 para 0,24 g/cm<sup>2</sup>, velocidade máxima de 25,6 para 1,14 g/cm<sup>2</sup>/h, porcentagem de perda total de 72% para 8%, porcentagem de perda no mesmo tempo de ensaio de 20 min de 72% para 4%. Observa-se que a argila apresenta suscetibilidade à erosão significativamente maior que o solo arenoso, nas condições estudadas.

GRÁFICO 33 – ENSAIO Inderbtzen, comparação dos ensaios 3 da argila e 10 do solo arenoso.



O Gráfico 34 destaca a importância da umidade inicial e dos ciclos de umedecimento e secagem na erosão da argila, confrontando os resultados das duas partes do ensaio 8 prolongado, com o mesmo corpo de prova submetido ao ensaio em duas condições diversas de umidade inicial. São significativas as diferenças obtidas entre os resultados da 1ª parte, na umidade natural, com a segunda parte, após a secagem ao ar do corpo de prova. A erosão total acumulada passa de 0,257 para 1,697  $\text{g/cm}^2$ , e a velocidade máxima de erosão vai de 4,20  $\text{g/cm}^2/\text{h}$  para 11,95  $\text{g/cm}^2/\text{h}$ .

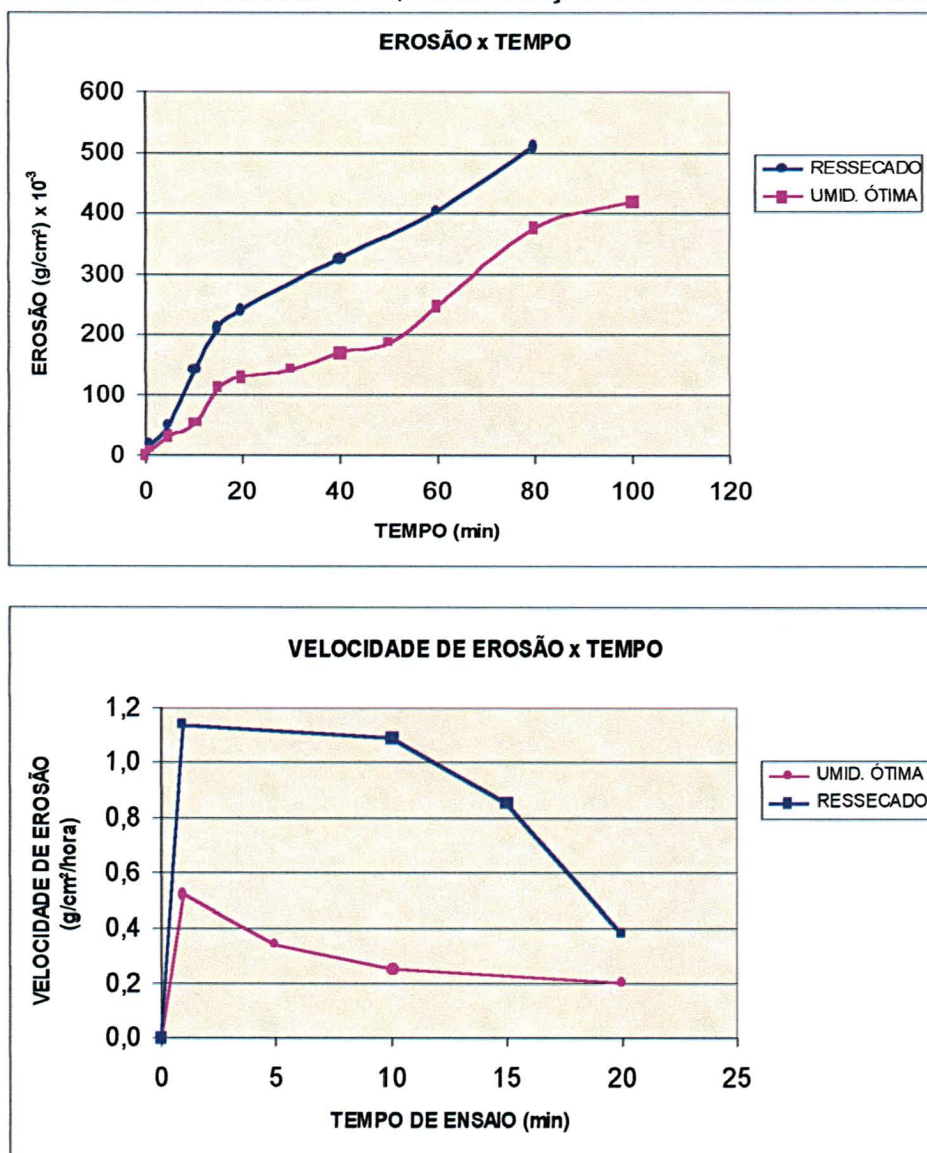
GRÁFICO 34 – ENSAIO 8 INDERBITZEN PROLONGADO, COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS PARTES





O Gráfico 35 destaca o efeito da secagem ao ar no solo arenoso compactado, confrontando os resultados dos dois ensaios. No ensaio 9, mantida a umidade de compactação, a erosão acumulada aos 20 min de ensaio foi de 0,130 g/cm<sup>2</sup> e a velocidade máxima de 0,52 g/cm<sup>2</sup>/h, considerando a curva de tendência. No ensaio 10, no qual o corpo de prova foi submetido a secagem ao ar após a compactação, a erosão acumulada aos 20 min passou a 0,243 g/cm<sup>2</sup> e a velocidade máxima a 1,14 g/cm<sup>2</sup>/h. A porcentagem de perda total foi de 6,96 e 7,58%, nos ensaios 9 e 10, respectivamente.

GRÁFICO 35 – ENSAIO INDERBITZEN, COMPARAÇÃO DOS ENSAIOS 9 E 10 DO SOLO ARENOSO



As comparações mostraram a importância de realizar ensaios com os solos em diferentes condições. As propostas apresentadas por alguns autores, anteriormente citados, de saturar os corpos de prova antes do ensaio para padronizar as condições, podem conduzir a resultados pouco representativos do comportamento natural. Além disso a argila estudada, quando submetida à imersão em água, mostrou-se significativamente menos erosiva do que quando ressecada.

Deve-se buscar uma maneira de contornar o problema de estudar o solo na condição de interesse, sem descuidar da questão da padronização do ensaio. Em lugar de saturar a amostra para eliminar a sucção, propõe-se determinar a sucção na condição a ser ensaiada, tentando estabelecer uma relação entre este valor e a erosão no ensaio Inderbitzen ou Inderbitzen Modificado. Os valores médios das diversas determinações de sucção realizadas estão indicados nos resultados de cada ensaio, verificando-se semelhanças com valores obtidos em outros estudos, citados no item 7.2. Embora não tenham sido realizados ensaios em condições e quantidade suficientes para esse fim, entende-se que é uma possibilidade de permitir comparar resultados de estudos diversos, mesmo que as condições de umidade dos materiais estudados sejam variadas.

Para aplicação da metodologia de classificação da suscetibilidade do solo à erosão proposta por Bastos (1999), além do gradiente de erosão entre 0 e 10 min apresentado para cada ensaio, seria ainda necessário realizar ensaios Inderbitzen com vazões ou inclinações de rampa variadas. Com os resultados disponíveis definiu-se apenas um ponto da reta que fornece a tensão cisalhante hidráulica crítica e a taxa de erodibilidade. O ponto tem como coordenadas o gradiente de erosão citado e a tensão cisalhante hidráulica que, nos ensaios realizados foi da ordem de 1,62 Pa. Para determinar esse parâmetro, foi feita uma interpolação entre os valores de velocidade do escoamento apresentados por Bastos (1999).

## 7.9 ENSAIO InderBITZEN MODIFICADO (GES)

Foram realizados 4 ensaios, sendo 2 com a amostra de argila (Amostra 1) e dois com o solo arenoso (Amostra 2).

Os corpos de prova de argila foram blocos indeformados aproximadamente cúbicos, com dimensões em torno de 20 x 15 x 5 cm (comprimento, largura, espessura). Um bloco foi ensaiado na umidade natural e o outro após secagem ao ar por aproximadamente 15 dias.

A amostra de solo arenoso foi compactada na umidade ótima e densidade máxima do Proctor normal, no molde cilíndrico de 10 x 12 cm (altura, diâmetro). O corpo de prova extraído do molde foi dividido longitudinalmente ao meio. Uma parte foi ensaiada nessas condições, e a outra na umidade higroscópica após secagem ao ar.

Foram adotados os mesmos parâmetros e metodologia semelhante ao ensaio Inderbitzen. Foi mantida a inclinação da rampa de 34° em relação à horizontal. A vazão média ficou em torno de 60,0 ml/s, que corresponde a cerca de 3,6 l/min. A redução de vazão em relação ao ensaio Inderbitzen, decorre da grande energia do “chuveiramento”, comparada ao escoamento superficial. Adotou-se a mesma duração de 20 min, que foi prolongada para erosão pequena ou não estabilizada.

A apresentação dos ensaios e seus resultados também são adaptações do ensaio Inderbitzen. Apenas foi acrescentado o gráfico “porcentagem de erosão acumulada *versus* tempo de ensaio” (FREIRE, 2001). A tentativa de comparação entre os dois ensaios é discutível, pois as áreas de incidência de água e as parcelas da vazão que atingem o corpo de prova são diferentes. Apenas qualitativamente parece ser possível comparar o resultado do ensaio Inderbitzen com o do Inderbitzen Modificado. O mesmo interesse em relacionar os ensaios de erosão no ensaio Inderbitzen com a sucção, descrito no item anterior, é válido também para o Inderbitzen Modificado, motivo pelo qual estão apresentados nos resumos os resultados das determinações de sucção pelo método do papel filtro (MARINHO, 1994).

a) resultados dos ensaios da argila:

a.1) argila na umidade inicial natural:

*Ensaio: 1*

*Observações prévias e iniciais:*

*Umidade inicial do solo: 17,3%*

*Sucção média: 2533,54 kPa*

*Controle prévio da vazão: 59,7 ml/s*

*Observações durante o ensaio:* Gráfico 36 (no gráfico está representado apenas o início do ensaio, que indica a tendência do comportamento)

*Controle da vazão no ensaio: 59,3 ml/s*

*Andamento do ensaio:* desprendimento de fragmentos do bloco ao longo do ensaio, provocando grandes variações nos resultados

*Observações após o ensaio:*

*Duração do ensaio: 100 min*

*Perda total de solo no ensaio: 1,481 g/cm<sup>2</sup>*

*Perda de solo em 20 min de ensaio: 0,824 g/cm<sup>2</sup>*

*Porcentagem de perda total de solo no ensaio: 12,44 %*

*Porcentagem de perda de solo em 20 min: 6,92 %*

*Máxima velocidade de erosão medida: 7,81 g/cm<sup>2</sup>/h*

*Intervalo da medição da máxima velocidade: 15 a 20 min de ensaio*

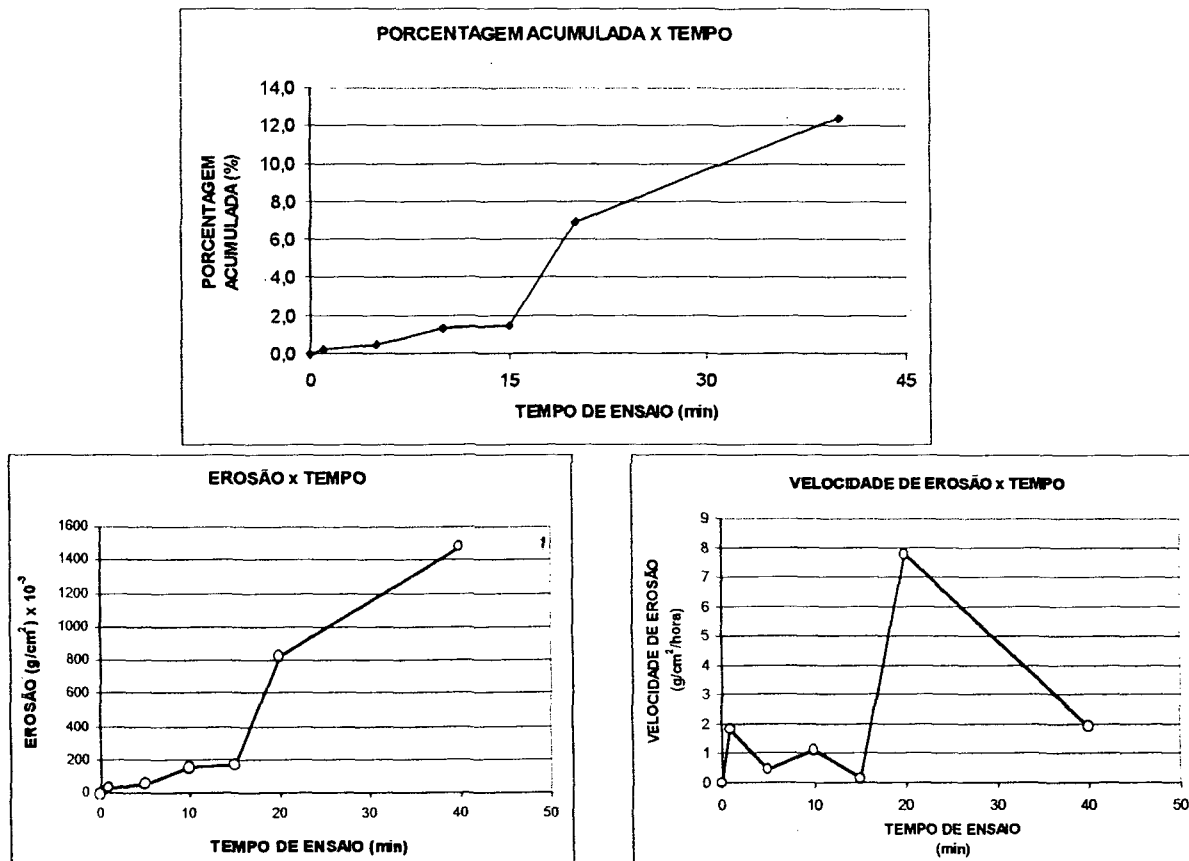
*Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio: 0,746 g/cm<sup>2</sup>/h*

*Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio: 0,016 g/cm<sup>2</sup>/min*

*Umidade final do solo: 27,0 %*



GRÁFICO 36 – ENSAIO 1 INDERBITZEN MODIFICADO, ARGILA NA UMIDADE NATURAL



a.2) argila na umidade inicial higroscópica:

*Ensaio: 2*

*Observações prévias e iniciais:*

*Umidade inicial do solo: 23,2% (antes da secagem ao ar)*

*Umidade inicial do solo: 10,8 % (após a secagem ao ar)*

*Sucção média: 25082,66 kPa*

*Controle prévio da vazão: 59,0 ml/s*

*Observações durante o ensaio: (Gráfico 37)*

*Controle da vazão no ensaio: não determinado*

*Andamento do ensaio: grande erosão e ensaio interrompido com 15 min;*

*fragmentos do bloco caíram nos recipientes de coleta de água, impedindo o controle da vazão e a coleta de material passante na peneira*

Observações após o ensaio:

Duração do ensaio: 15 min

Perda total de solo no ensaio: 9,680 g/cm<sup>2</sup>

Porcentagem de perda total de solo no ensaio: 74,57 %

Máxima velocidade de erosão medida: 107,58 g/cm<sup>2</sup>/h

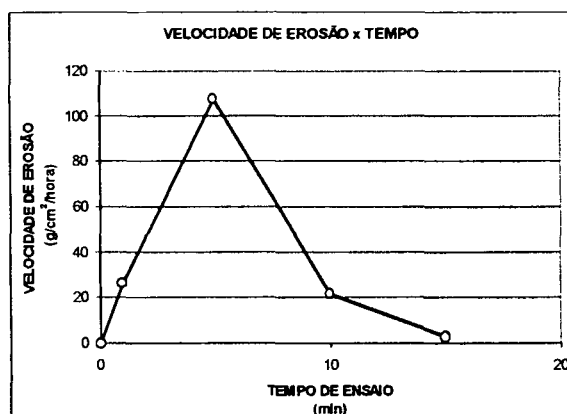
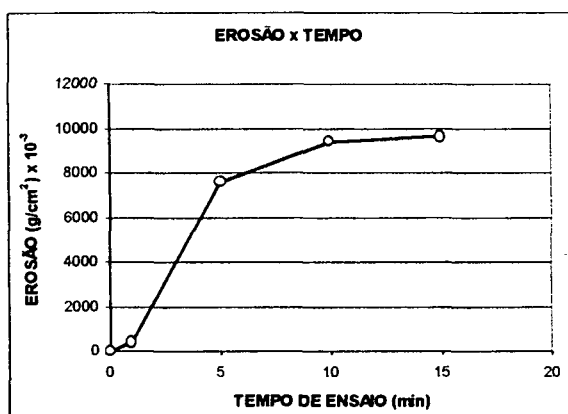
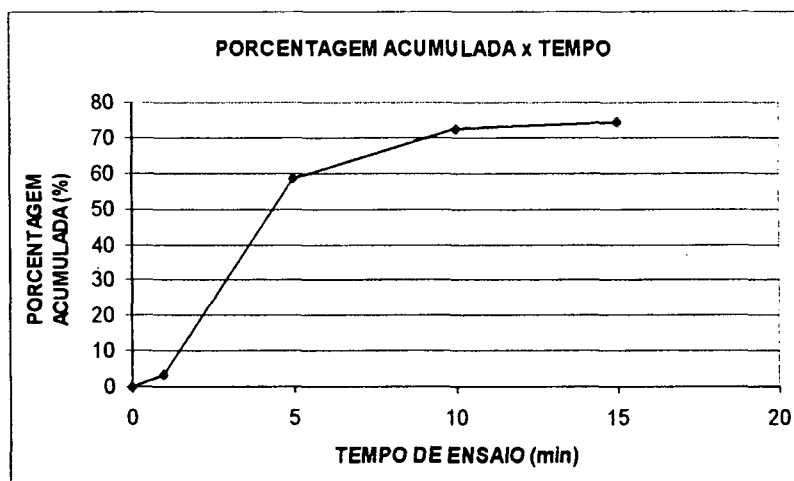
Intervalo da medição da máxima velocidade: 1 a 5 min de ensaio

Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio: 91,29 g/cm<sup>2</sup>/h

Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio: 0,943 g/cm<sup>2</sup>/min

Umidade final do solo: não determinada

GRÁFICO 37 – ENSAIO 2 INDERBITZEN MODIFICADO, ARGILA RESSECADA



b) resultados dos ensaios do solo arenoso:

b.1) solo arenoso na umidade inicial ótima:

Ensaio: 3

Observações prévias e iniciais:

Umidade inicial do solo: 10,2 %

Sucção média: 1681,95 kPa

Massa específica aparente do solo úmido: 2,17 g/cm<sup>3</sup>

Massa específica aparente do solo seco: 1,97 g/cm<sup>3</sup>

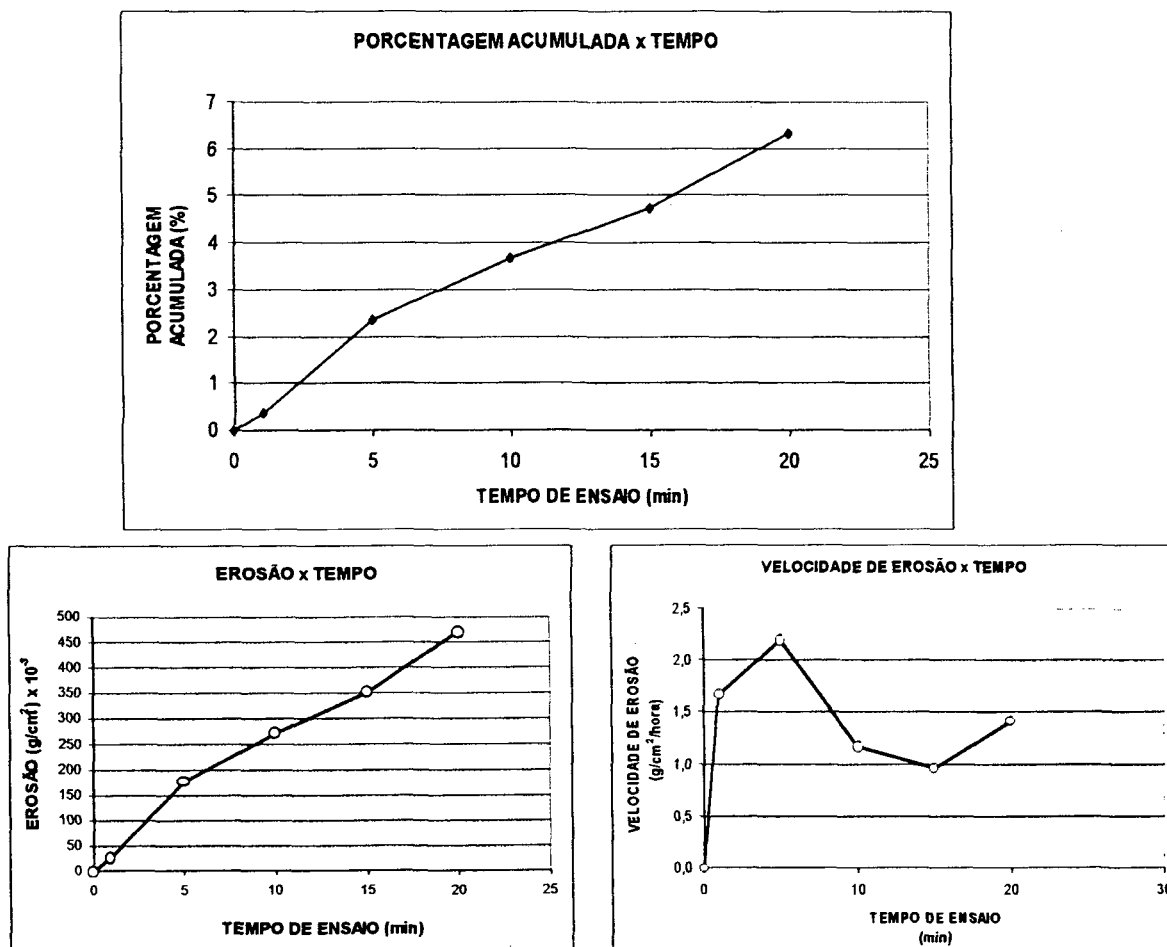
Controle prévio da vazão: 60,6 ml/s

Observações durante o ensaio: (Gráfico 38)

Controle da vazão no ensaio: 60,3 ml/s

Andamento do ensaio: normal

GRÁFICO 38 – ENSAIO 3 INDERBITZEN MODIFICADO, SOLO ARENOSO NA UMIDADE ÓTIMA



*Observações após o ensaio:*

*Duração do ensaio:* 20 min

*Perda total de solo no ensaio:* 0,472 g/cm<sup>2</sup>

*Porcentagem de perda total de solo no ensaio:* 6,2 %

*Máxima velocidade de erosão medida:* 2,20 g/cm<sup>2</sup>/h

*Intervalo da medição da máxima velocidade:* 1 a 5 min de ensaio

*Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio:* 2,09 g/cm<sup>2</sup>/h

*Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio:* 0,027 g/cm<sup>2</sup>/min

*Umidade final do solo:* não determinada

b.2) solo arenoso na umidade inicial higroscópica:

*Ensaio:* 4

*Observações prévias e iniciais:*

*Umidade inicial do solo:* não determinada; estimada em 0,9 %

*Sucção média:* 24148,69 kPa

*Massa específica aparente do solo úmido (antes da secagem):* 2,17 g/cm<sup>3</sup>

*Massa específica aparente do solo seco (antes da secagem):* 1,97 g/cm<sup>3</sup>

*Controle prévio da vazão:* 58,3 ml/s

*Observações durante o ensaio:* (Gráfico 39)

*Controle da vazão no ensaio:* 57,6 ml/s

*Andamento do ensaio:* normal até os 10 min, quando o corpo de prova  
dividiu-se em duas partes, afetando a incidência de água

*Observações após o ensaio:*

*Duração do ensaio:* 15 min

*Perda total de solo no ensaio:* 5,265 g/cm<sup>2</sup>

*Porcentagem de perda total de solo no ensaio:* 74,68 %

*Máxima velocidade de erosão medida:* 102,40 g/cm<sup>2</sup>/h

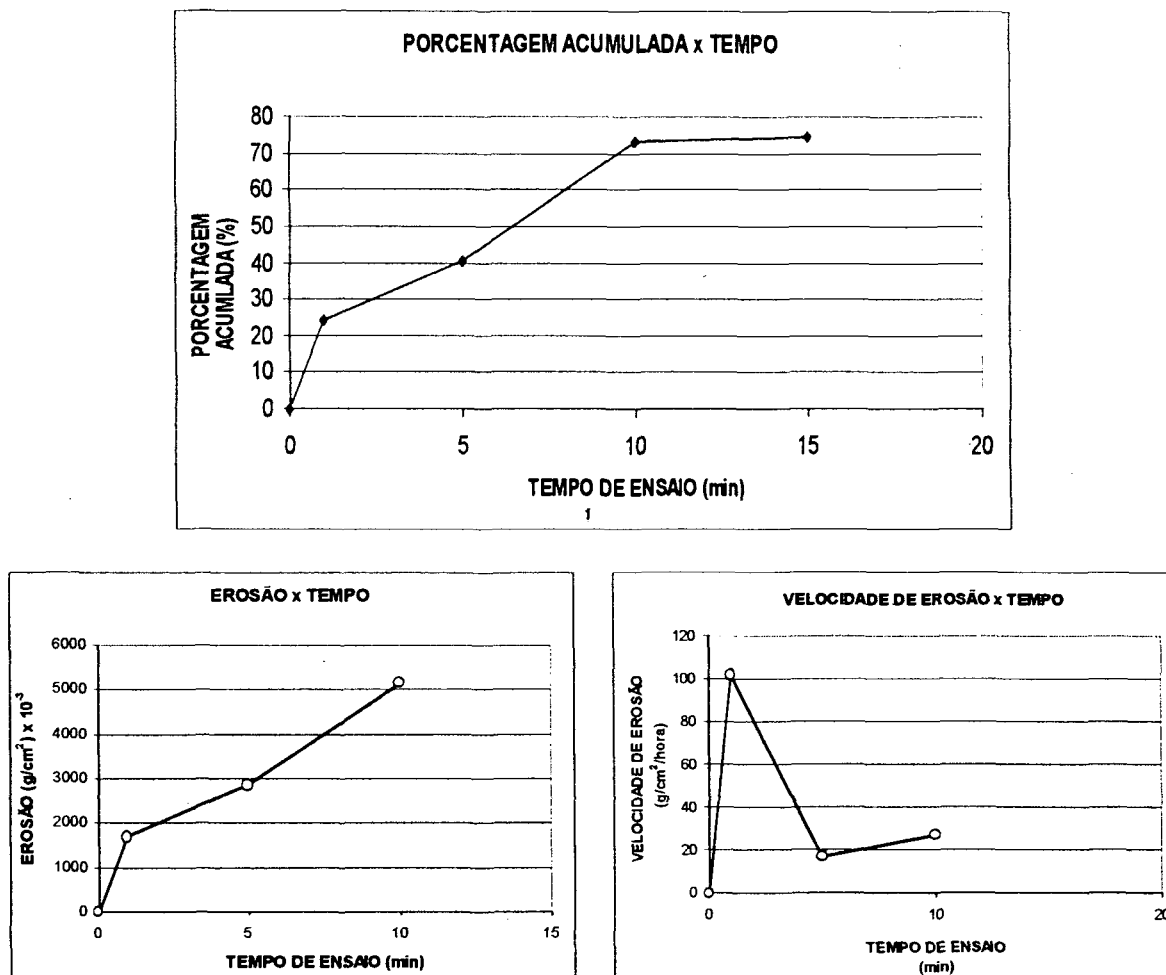
*Intervalo da medição da máxima velocidade:* 0 a 1 min de ensaio

*Velocidade de erosão entre 0 e 5 min de ensaio:* 34,38 g/cm<sup>2</sup>/h

*Gradiente de erosão entre 0 e 10 min de ensaio:* 0,516 g/cm<sup>2</sup>/min

*Umidade final do solo:* 17,2 %

GRÁFICO 39 - ENSAIO 4 Inderbitzen Modificado, solo arenoso na unidade higroscópica



c) discussão dos resultados:

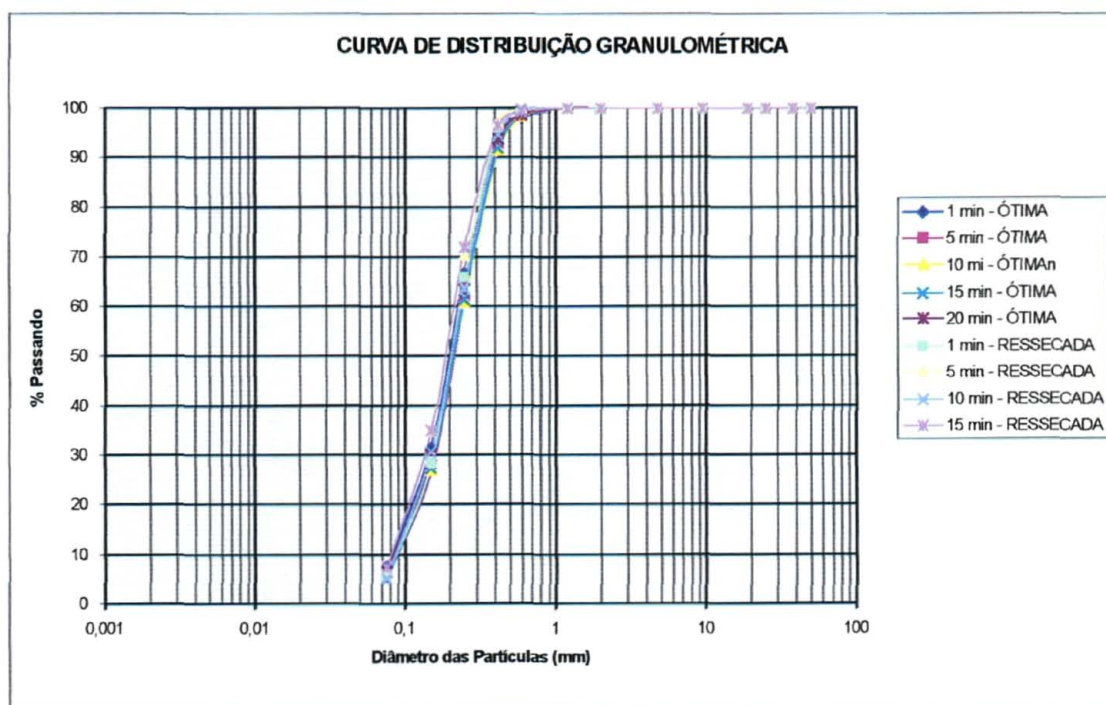
O ensaio permitiu observações e análises interessantes. O corpo de prova não confinado pode ser uma vantagem para a simulação, porém dificulta a operação e cálculos do ensaio. A metodologia ainda precisa ser melhorada, por ser um ensaio novo. Convém pesquisar e buscar essas melhorias, devido ao interesse que o ensaio apresenta.

A incorporação de procedimentos semelhantes aos adotados no ensaio Inderbitzen, mostrou-se como um caminho promissor para o desenvolvimento da metodologia. Facilitou sua operação e permitiu comparações qualitativas entre os dois

ensaios. A comparação com a sucção é interessante, pelas razões já apontadas no ensaio Inderbitzen (Item 7.8).

É possível fazer a análise granulométrica de solo retido na peneira. A título de exemplo, analisou-se a granulometria do material erodido nos testes do solo arenoso. No Gráfico 40 foram reunidas as curvas granulométricas do material erodido, retido na peneira a cada intervalo de tempo do ensaio 3, do solo arenoso na umidade de compactação, e do ensaio 4 do solo arenoso na umidade higroscópica.

GRÁFICO 40 – ENSAIOS 3 E 4 INDERBITZEN MODIFICADO, GRANULOMETRIA DO MATERIAL ERODIDO DO SOLO ARENOSO NA UMIDADE ÓTIMA E NA UMIDADE HIGROSCÓPICA

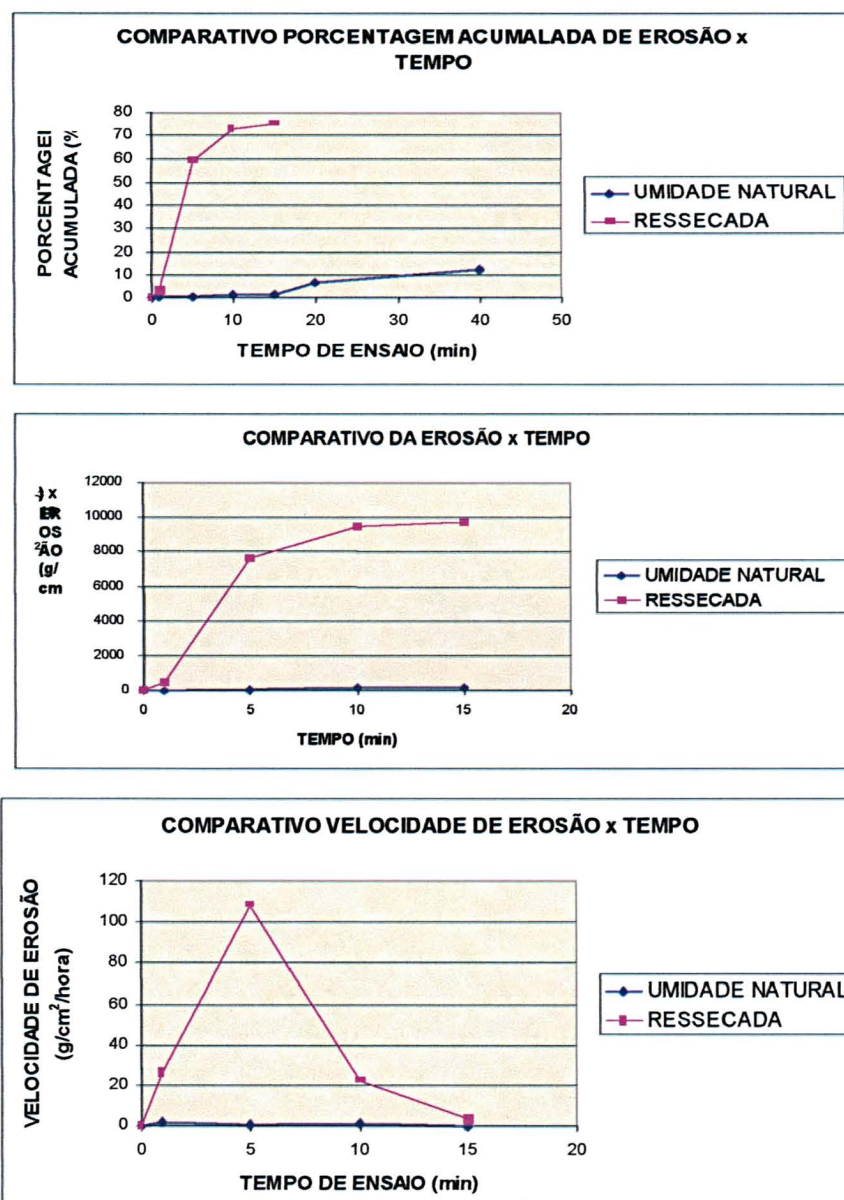


Nesse caso, as curvas granulométricas praticamente coincidiram. Certamente o efeito de agregação de partículas, destacado no caso da argila no ensaio Inderbitzen (Gráfico 31), não ocorre com a mesma intensidade no solo arenoso.

No Gráfico 41 compararam-se os resultados dos ensaios Inderbitzen Modificado 1 e 2, realizados com a argila na umidade natural e na umidade higroscópica, respectivamente. A influência da umidade inicial da argila no seu comportamento foi

significativa. A porcentagem de perda total passou de 12% para 75%, na umidade natural e na higroscópica, respectivamente. A perda unitária aos 15 minutos de ensaio passou de cerca de 1,5 para 9,7 g/cm<sup>2</sup>, e a velocidade máxima de erosão de 7,8 para 107,6 g/cm<sup>2</sup>/h. Os valores indicam que a secagem transforma a argila com baixa ou média erodibilidade, em um material extremamente suscetível a erosão.

GRÁFICO 41 – ENSAIOS 1 E 2 Inderbitzen Modificados, Comparação da Argila na Umidade Natural e Ressecada

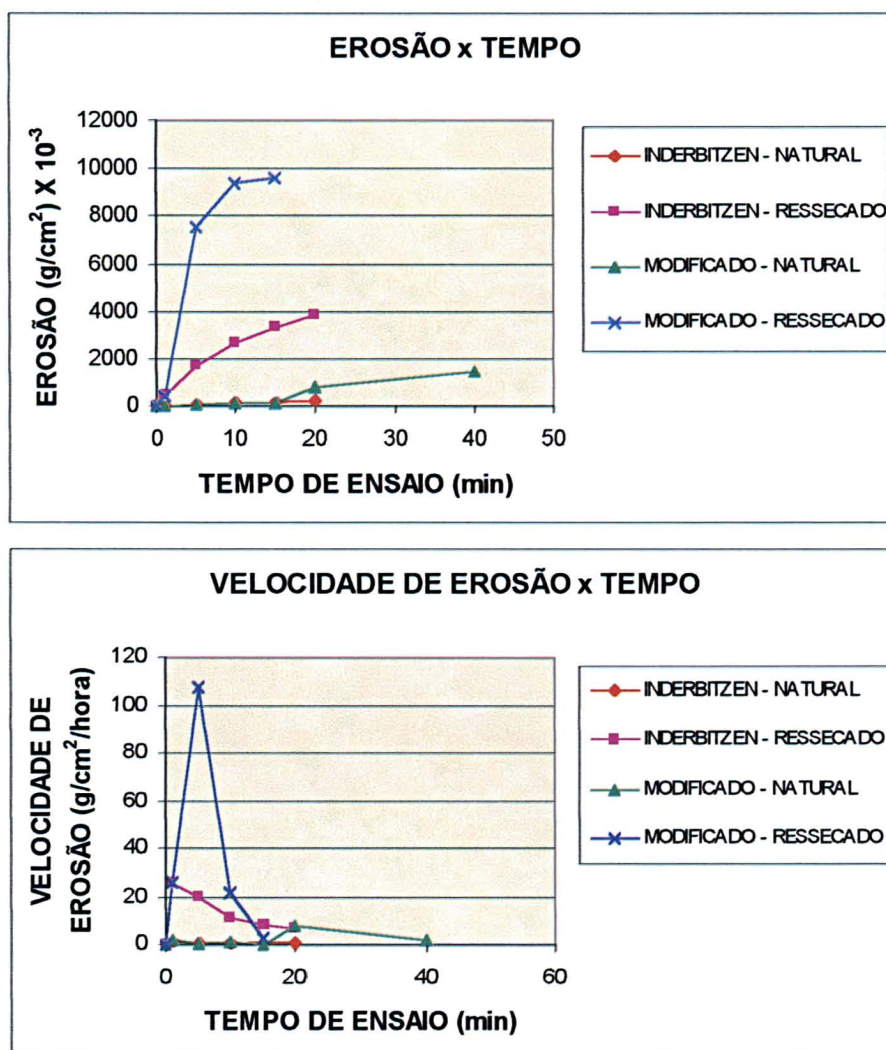




Observou-se na argila o efeito de escala do ensaio, através da presença das superfícies polidas características da Formação Guabirotuba (Capítulo 3), expostas pela erosão ocorrida.

No Gráfico 42 compararam-se os resultados de ensaios Inderbitzen e Inderbitzen Modificado da argila, nas umidades natural e higroscópica.

GRÁFICO 42 – COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS INDERBITZEN 2 E 3, E INDERBITZEN MODIFICADO 1 E 2, DA ARGILA NAS UMIDADES NATURAL E HIGROSCÓPICA



Nessa comparação entre ensaios da argila observou-se que, para condições semelhantes de umidade inicial, a erosão no Inderbitzen Modificado foi maior do que no

ensaio Inderbitzen. Essa diferença confirmou as expectativas, devido ao incremento de energia representado pelo impacto das gotas. No entanto tal comparação é discutível, pois a vazão que incidiu diretamente sobre o corpo de prova não é a mesma, além da diferença proporcionada pelo confinamento do anel no ensaio Inderbitzen. No caso do solo arenoso, é possível que a falta de confinamento no Inderbitzen Modificado seja uma das causas da diferença observada entre os resultados desses ensaios e do Inderbitzen, pois a resistência de solos granulares é diretamente afetada pelo confinamento.

## 8 CONCLUSÕES

Alguns dos ensaios de erosão da metodologia puderam ser realizados com os materiais e equipamentos usualmente disponíveis em laboratórios de solos, como no caso dos ensaios sedimentométrico comparativo, torrão e desagregação. Outros exigiram equipamentos próprios, como o do furo de agulha, Inderbitzen e Inderbitzen Modificado. Porém são relativamente simples e de baixo custo, e foram desenvolvidos no próprio laboratório ou em pequenas oficinas. É exceção a análise química da água intersticial que, dependendo do método empregado, pode envolver equipamentos sofisticados e de custo elevado. Por esse motivo, buscou-se comparar resultados da análise química da água extraída da argila estudada, obtidos por diferentes métodos, buscando ampliar as possibilidades de sua execução e, eventualmente, redução de custos de implantação, conforme descrito adiante. Foram comparados resultados de três métodos distintos: de absorção atômica, de cromatografia iônica e, o terceiro, resultante da combinação de titulação complexométrica (para cálcio e magnésio) com fotometria de chama (para sódio e potássio). Essa terceira alternativa estudada, apesar de menos precisa é realizada com equipamentos mais simples e rudimentares, disponível em maior número de laboratórios. A semelhança dos resultados obtidos permite concluir que, ao menos para o solo estudado, qualquer um dos métodos pode ser utilizado, apesar da maior precisão dos resultados obtidos com equipamentos sofisticados.

Foi possível distinguir dois caminhos possíveis na implementação dos ensaios. O primeiro com o objetivo da padronização e da normatização, importante para ensaios rotineiros destinados a serviços técnicos e para comparações entre diferentes estudos. O outro, segue na direção da criatividade e da adaptação de métodos e técnicas, adequado para pesquisas com o objetivo de compreender um processo erosivo ou de identificar características peculiares de solos ainda pouco estudados.

Sobre a questão da padronização verificou-se que, dos sete ensaios de erosão implementados, quatro já dispõem de normas brasileiras e os outros três, desagregação, Inderbitzen e Inderbitzen Modificado, ainda não. Diversos relatos

(FÁCIO, 1991; SANTOS, 1997; BASTOS, 1999; LEMOS, 2002) recomendam a elaboração de normas para os ensaios de desagregação e Inderbitzen. A forma adotada para a apresentação dos ensaios (Capítulo 6) pode contribuir para isso. O Inderbitzen Modificado, com poucas referências disponíveis, exigiu a elaboração de procedimentos. Para os ensaios normatizados foi necessário adaptar procedimentos, especialmente para aplicação ao solo argiloso rijo da Formação Guabirotuba, de comportamento peculiar e complexo. No trabalho estão detalhadamente descritos os procedimentos adotados e as observações correspondentes (Capítulo 6), a apresentação e discussão dos resultados dos ensaios (Capítulo 7) e as planilhas de ensaio (Anexo), de modo a constituir uma orientação para futuros estudos.

Na linha da livre adaptação dos ensaios a pesquisas, algumas propostas foram apresentadas no trabalho. São procedimentos de difícil padronização, porém permitem realizar ensaios adaptados às características específicas de um solo ou aos objetivos próprios de um estudo. Alguns dos ensaios da metodologia apresentam grande potencial no sentido de tentar reproduzir em laboratório processos naturais que podem comandar o comportamento dos solos, como os ciclos de umedecimento e secagem, alternados e repetidos, responsáveis pelo “empastilhamento”, ressecamento e retração da argila rija da Formação Guabirotuba. Além do procedimento usual para esse fim, comparando-se resultados de ensaios com amostras na umidade natural e ressecadas ao ar, foi realizada em ensaios Inderbitzen e de desagregação uma forma de ciclagem do corpo de prova durante ensaios mais prolongados. Após o ensaio, o corpo de prova era submetido ao ressecamento ao ar, para realização de novo ensaio. O procedimento permitiu também a redução das variáveis em estudos, por tratar-se do mesmo corpo de prova submetido a diferentes condições de ensaio. Aparentemente pode ser adotado também em outros ensaios, como o Inderbitzen Modificado e do furo de agulha.

Foi proposta a correlação da erosão com a sucção, em lugar de sua eliminação por saturação prévia do corpo de prova. O método de determinação da sucção pelo método do papel filtro mostrou-se adequado para essa finalidade. Dessa forma foi possível ensaiar a amostra em sua umidade natural ou em diferentes condições de umidade inicial, numa tentativa de entender melhor o comportamento do solo, bem com de

permitir fazer previsões mais próximas da realidade e a favor da segurança. Esse procedimento foi proposto nos ensaios Inderbitzen e Inderbitzen Modificado, mas pode ser igualmente adotado nos ensaios de desagregação, torrão e furo de agulha.

Entre os quatro ensaios destinados a avaliar a dispersibilidade, o ensaio do furo de agulha é considerado por diversos pesquisadores como o mais preciso (SHERARD et al., 1976b). Porém apresentou importantes limitações para a argila expansiva, com dificuldades operacionais e de análise de resultados.

O ensaio de torrão, por sua simplicidade, facilidade e baixo custo, merece ser incluído em estudos de erosão. Como os demais ensaios realizados, tem caráter predominantemente qualitativo e comparativo. Por ser um ensaio direto, permite não apenas comparar diferentes solos, mas também o mesmo solo sob diferentes condições iniciais. Contrariando recomendação freqüente na literatura, os ensaios realizados com solução de hidróxido de sódio mostraram sua importância. Indicaram a dispersão da fração argilosa da amostra de solo arenoso estudada, não identificada na maior parte dos demais ensaios. Apesar de não constituir prova suficiente, esse resultado sugere que o ensaio de torrão, realizado com solução de hidróxido de sódio, pode realçar uma reação dispersiva insuficientemente significativa para ser detectada em outros testes.

O ensaio sedimentométrico comparativo apresentou algumas dificuldades em sua realização e interpretação. A sedimentação do solo, acentuada pela falta da solução defloculante e pela preparação da amostra sem uso de dispersão mecânica, pode prejudicar as últimas leituras densimétricas, exigindo ajustes nas curvas. Esse fato não é restrito ao ensaio sedimentométrico comparativo, pois ocorre em outros ensaios de sedimentação com e sem defloculante (CARVALHO et al., 1996). Verificaram-se também patamares horizontais na curva granulométrica, que podem estar relacionados com a pequena quantidade de solo utilizado no ensaio e com a acurácia do densímetro usualmente utilizado e preconizado pela norma brasileira.

Para determinados tipos de solos, a análise química da água intersticial pode apresentar dificuldades operacionais e prazos incompatíveis com a maioria dos

estudos. Para os solos finos da Formação Guabirotuba, a extração de água foi um processo lento e trabalhoso.

O ensaio de desagregação mostrou-se de execução simples e fácil, sem a necessidade de equipamentos. Permitiu uma avaliação preliminar mais completa do que o ensaio de torrão. Forneceu, como resultados qualitativos, indícios do comportamento e características dos solos estudados, inclusive a comparação do mesmo solo em diferentes condições como, por exemplo, umidade inicial diversa. Permitiu simular aspectos importantes para o estudo da erosão, como o fenômeno do “empastilhamento” do solo. As maiores dificuldades relacionam-se com as incertezas da descrição e velocidade de ocorrência dos processos observados (LEMOS, 2002). Poderiam ser resolvidas com normatização e padronização, pois trata-se apenas de estabelecer critérios para a descrição das observações, bem como para considerar a sua velocidade de ocorrência.

Confirmando observações de diversos pesquisadores, o ensaio Inderbitzen mostrou-se uma ótima ferramenta para estudos laboratoriais de erosão (BRASIL, 1979; FERREIRA e FONSECA, 1981; FÁCIO, 1991; BASTOS, 1999; LEMOS, 2002). Forneceu bons resultados qualitativos sobre o comportamento e as características dos solos estudados. Foi possível comparar diferentes solos entre si, bem como o mesmo solo sob diferentes condições de umidade inicial. Permitiu reproduzir e simular processos naturais, conforme citado anteriormente. Para solos com características heterogêneas e descontinuidades, como no caso da argila estudada, apresenta a vantagem do efeito de escala, pois corpos de prova maiores representam comportamento experimental mais próximo do real (KORMANN, 2002). O ensaio Inderbitzen adapta-se tanto a ensaios para pesquisas, como para serviços rotineiros, merecendo ser objeto de uma normatização de equipamentos e procedimentos para este fim. Além de materiais e equipamentos usuais de laboratório, exige a fabricação de alguns equipamentos, que não representam custos excessivamente elevados para os laboratórios (FRAGASSI e MARQUES, 2001; MACIEL JÚNIOR et al., 2002). A maior dificuldade do ensaio foi estabelecer um procedimento adequado e cuidadoso, com um bom planejamento das operações. Alguns cuidados foram fundamentais para o sucesso

do ensaio, como o controle da vazão e a vedação para evitar infiltração de água através do corpo de prova. Para esta vedação, a utilização de massa de calafetar mostrou-se perfeitamente adequada.

O GES ou Inderbitzen Modificado permitiu também bons ensaios, de forma semelhante ao ensaio Inderbitzen. Pode ser mais vantajoso no que se refere ao efeito de escala, devido a possibilidade de utilizar amostras indeformadas de dimensões ainda maiores, bem como nas questões da eliminação da infiltração e da perturbação do fluxo na descontinuidade entre o corpo de prova e a rampa, apontadas como falhas do ensaio Inderbitzen. Porém, a vantagem mais evidente está na inclusão da desagregação de partículas pelo impacto das gotas. A exemplo dos ensaios de torrão e desagregação, o Inderbitzen Modificado é um ensaio de erosão com amostra não confinada. Apesar das vantagens apontadas, trata-se de ensaio ainda pouco utilizado, que merece ser melhor estudado, visando o desenvolvimento de equipamentos e elaboração de procedimentos. Uma tentativa inicial de padronização foi proposta, com base no procedimento do ensaio Inderbitzen. Porém, é preciso resolver problemas de controle da vazão que efetivamente incide sobre a amostra, padronização do corpo de prova, área de exposição ao “chuveiramento”, entre outros.

A correlação de erosão com ensaios rotineiros de caracterização geotécnica, tais como os limites de Atterberg e a análise granulométrica, serviram como indicação e alerta para a possibilidade de erosão. Porém essas correlações, da mesma maneira que os ensaios indiretos de erosão, como o sedimentométrico comparativo e a análise química da água intersticial, não apresentaram a mesma importância e capacidade de qualquer dos métodos diretos utilizados. A enorme influência do estado do solo e de sua umidade inicial, evidenciada nos resultados dos ensaios diretos, não pode ser detectada através desses ensaios e correlações.

Os resultados dos ensaios, algumas vezes conflitantes entre si, outras não, indicam que é recomendável aplicar e comparar métodos diversos em qualquer estudo. Além disso, maior quantidade de repetições de cada ensaio, permitindo um tratamento estatístico dos resultados, mostra-se igualmente conveniente.



Apesar de não constituir o foco da pesquisa, algumas suposições puderam ser formuladas com a aplicação da metodologia aos solos estudados. Para sua comprovação, maior quantidade de cada tipo de ensaio e o tratamento estatístico de seus resultados são necessários.

Solos arenosos finos são usualmente considerados como suscetíveis a erosão por carreamento de partículas. O solo arenoso estudado mostrou essa tendência atenuada, provavelmente devido à compactação. Porém, para que essa medida mantenha sua eficiência ao longo do tempo, a umidade de compactação deve ser, tanto quanto possível, preservada. Os ensaios mostraram que a secagem do solo compactado, aumentou consideravelmente sua suscetibilidade à erosão. O desconfinamento deste solo também afetou a resistência à erosão. A dispersibilidade, usualmente associada apenas a solos de predominância argilosa, pode afetar também a erosão em solo arenoso, desde que tenha uma fração fina significativa. A dispersibilidade manifestou-se quando o solo compactado foi submetido a métodos agressivos de ensaio para este fim.

Solos argilosos, são frequentemente considerados menos suscetíveis a erosão por carreamento de partículas pela água, do que os granulares, exceto nos casos de dispersibilidade. Porém, a argila rija da Formação Guabirotuba estudada na pesquisa, proveniente do Sítio Experimental de Geotecnia do Centro Politécnico da UFPR, pode certamente ser incluída entre os solos de grande suscetibilidade à erosão, apesar de não ter apresentado evidências de dispersibilidade. A suscetibilidade mostrou-se dependente de sua condição inicial no evento erosivo. Essa argila, ao sofrer secagem ao ar, tem intensificadas suas características de “empastilhamento”, retração e fraturamento, que comandam seu comportamento diante da erosão. Dessa maneira passou de um solo de erosão baixa ou média em sua umidade natural, para um material extremamente suscetível à erosão. Confirmam-se pesquisas citadas anteriormente (FELIPE, 1999), que recomendam evitar a exposição desse solo em taludes, escavações e aterros. Sua superfície deve ser mantida protegida por vegetação ou por outros materiais, para preservar sua umidade. O comportamento

complexo e peculiar deste material exigiu adaptações e cuidados especiais em todos os métodos de ensaio pesquisados.

## 8.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Maior quantidade de ensaios e em condições de umidade diversificadas, para confirmar a possibilidade de estabelecer uma adequada relação entre erosão, umidade e sucção, é necessária. Permitiria também verificar as observações e discussões realizadas no estudo, baseadas em poucas repetições.

É conveniente aprofundar a pesquisa sobre a influência da forma de preparação de amostras no comportamento de determinados materiais, inclusive para o estudo sobre a argila da Formação Guabirotuba. É necessário desenvolver procedimentos para a preparação de amostras por via úmida.

Equipamento ou material complementar ao previsto na NBR 13603, deveria ser desenvolvido para melhorar a eficiência na operação de extração da água intersticial. Por exemplo um processo para a condensação do ar no interior do kitassato, ou na ligação entre o kitassato e a bomba de vácuo, pode facilitar e acelerar essa etapa.

Tendo em vista os bons resultados do ensaio Inderbitzen para a argila rija da Formação Guabirotuba, poderia ser testada a aplicação da metodologia de classificação da suscetibilidade à erosão proposta por Bastos (1999), através de ensaios com vazões e inclinações de rampa variadas.

O ensaio Inderbitzen Modificado mostra-se como uma idéia interessante e promissora, mas depende de desenvolvimento envolvendo equipamentos, procedimentos e análise de resultados.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Solo – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986 (a).

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986 (b).

\_\_\_\_\_. **NBR 12007**: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 13601**: Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*crumb test*). Rio de Janeiro, 1996 (a).

\_\_\_\_\_. **NBR 13602**: Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS. Rio de Janeiro, 1996 (b).

\_\_\_\_\_. **NBR 13603**: Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos, por meio de ensaios químicos em amostra de água intersticial. Rio de Janeiro, 1996 (c).

\_\_\_\_\_. **NBR 14114**: Solo - Solos argilosos dispersivos – classificação por meio do ensaio do furo de agulha (*pinhole test*). Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO/IEC 17025**: Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2001.

ALMEIDA, F.F.M. de, RIBEIRO, A.C.O. A Terra em transformação. In: OLIVEIRA, A.M. dos S. e BRITO, S.N.A. de (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 7-13.

ANGULO, R.J. **Relações entre a erodibilidade e algumas propriedades de solos brasileiros**. Curitiba – 1983. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

ANTONIUTTI NETO, L.; FERREIRA, C.C.; KORMANN, A.C.M.; CHAMECKI, P.R. e RUSSO NETO, L. Fundações diretas na Formação Guabirotuba: caso de obra com o

uso do ensaio de placa. **Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba**, Curitiba, ABMS e UFPR, 1999. p. 139-148.

ARAUJO, R.C. **Estudo da erodibilidade de solos da Formação Barreiras – RJ**. Rio de Janeiro, 2000. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

ARULANANDAN, K.; LOGANATHAN, P. e KRONE, R.B. Pore and eroding fluid influences on surface erosion of soil. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, Vol. 100, No. GT1, p. 51-66, Jan. 1975.

BASTOS, C.A.B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Porto Alegre, 1999. 298 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BASTOS, C.A.B., MILITITSKY, J. e GEHLING, W.Y.Y. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico – pesquisas e tendências. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Porto Alegre, n. 1, p. 17-25, nov. 2000.

BASTOS, C.A.B., GEHLING, W.Y.Y. e MILITITSKY, J. Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Porto Alegre, n. 2, p. 9-18, maio 2001.

BENDER, H. Erosion: um problème de résistance au cisaillement em fonction du chemin des contraintes pendant l'infiltration. **Proceedings of the International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils**, 1, Brasília, ABMS, 1985. p. 15-25.

BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livroceres, 1985. 392 p.

BIGARELLA, J.J. e MAZUCHOWSKI, J.Z. **Visão integrada da problemática da erosão**. Curitiba: ADEA e ABGE, 1985. 329 p. Livro Guia apresentado ao 3º Simpósio Nacional de Controle da Erosão, Maringá.

BORDEAUX, G. e NAKAO, H. Ensaio sobre argilas dispersivas. **Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5, São Paulo, ABMS, 1974. p. 145-155.

BOSZCZOWSKI, R.B. **Avaliação da tensão lateral de campo de argilas sobreadensadas: ensaios de laboratório com um solo da Formação Guabirotuba**. Rio de Janeiro, 2001. 286 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

BRASIL. Ministério dos Transportes – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Instituto de Pesquisas Rodoviárias – Divisão de Pesquisas. **Recomendações para proteção de taludes contra erosão**. Rio de Janeiro/RJ:IPR/DNER, 1979. 59 p.

CAMPOS, T.M.P.; DELGADO, C.C.; TIBANA, S.; AGUILAR, S.A.S. e FONSECA, E.C. Determinação da curva característica de sucção em laboratório. **Anais da Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas**, 1, Rio de Janeiro, ABMS e ABGE, 1992. p.835-851.

CARVALHO, J.C.; GUIMARÃES, R.C.; CARDOSO, F.B.F. e PEREIRA, J.H.F. Proposta de uma nova metodologia para ensaios de sedimentação. **Anais da Reunião Anual de Pavimentação**, 30, Salvador, ABPv e DER-Bahia, 1996, p. 520-531.

CHAMECKI, P.R.; KORMANN, A.C.M.; NASCIMENTO, N.A.; DYMINSKI, A.S. Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR – objetivos e dados preliminares. **Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 11, Brasília, ABMS, 1998. p. 819-826.

CHAVES, H.M.L. Modelagem matemática da erosão hídrica: passado, presente e futuro. In: **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**, Viçosa: SBCS e UFV, 1996. p. 731-750.

COZZOLINO, V.M.N. e NOGAMI, J.S. Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. **Solos e Rochas**, São Paulo, n. 16, v. 2, p. 77-91, agosto 1993.

D'AGOSTINI, L.R. Epistemologia da modelagem da erosão. In: **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**, Viçosa: SBCS e UFV, 1996. p. 723-729.

\_\_\_\_\_. **Erosão: o problema mais que o processo**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1999. 131 p.

D'AGOSTINI, L.R., MARTINI, L.C.P. e SCHLINDWEIN, S.L. Índice-indicador de desempenho ambiental: uma metodologia integradora de perspectivas no controle da erosão. Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 7. **Relação de trabalhos**. Goiânia: ABGE, [s.n.], 2001. CD-ROM.

DUARTE, J.M.G. **Um estudo geotécnico sobre o solo da Formação Guabirotuba, com ênfase na determinação da resistência residual**. São Paulo, 1986. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

\_\_\_\_\_. A resistência residual dos solos da Formação Guabirotuba e sua importância na estabilidade de taludes. **Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba**, Curitiba, ABMS e UFPR, 1999. p. 77-91.

FÁCIO, J.A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. Brasília, 1991. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

FAO. **La erosion del suelo por el agua**: algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. Roma: Organizacion de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentacion, 1967. 207 p. (Cuadernos de fomento agropecuario, n. 81).

FELIPE, R.S. A erodibilidade da Formação Guabirotuba. **Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba**, Curitiba, ABMS e UFPR, 1999. p. 53-63.

FONSECA, A.M.M.C.C. e FERREIRA, C.S.M. Metodologia para determinação de um índice de erodibilidade de solos. **Anais do Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia**, 1, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, CNPq e ABMS, 1981. p. 646-667.

FRAGASSI, P.F.M. e MARQUES, E.A.G. Desenvolvimento de uma nova versão do aparelho Inderbitzen. **Simpósio Nacional de Controle de Erosão**, 7. **Relação de trabalhos**. Goiânia: ABGE, [s.n.], 2001. CD-ROM.

FREIRE, E.P. Ensaio Inderbitzen modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. **Simpósio Nacional de Controle de Erosão**, 7. **Relação de trabalhos**. Goiânia: ABGE, [s.n.], 2001. CD-ROM.

FREIRE, E.P. e GALVÃO, L. Avaliação do grau de erodibilidade do solo através do ensaio Inderbitzen Modificado. **Anais do Congresso Nacional de Geotecnia**, 8, Lisboa, Sociedade Portuguesa de Geotecnia e LNEC, 2002. p. 419-426.

GOMES, R.O.M. **Sistemas de gestão da qualidade e ambiental direcionados a um laboratório de geossintéticos** (título provisório). Dissertação a ser apresentada ao ITA - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2002.

GOMES, R.O.M.; SANTOS, C.T. e VIDAL, D. Importância da garantia de qualidade dos resultados de ensaios no controle tecnológico de obras de proteção ambiental. **Anais do Seminário Nacional sobre Geossintéticos na Geotecnia Ambiental- GEOSSIGA'2001**, São José dos Campos, IGS-Brasil e UNIVAP, 2001. p. 129-135.

GUERRA, A.J.T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A.J.T., SILVA, A.S. e BOTELHO, R.G.M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos**: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 17-55.

HACH-HACH, A.M. e LIMA, R.E. Qualificação e monitoramento dos riscos geológicos relacionados à formação geológica de Guabirotuba na Grande Curitiba-PR. **Anais da**

**Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba**, Curitiba, ABMS e UFPR, 1999. p.111-117.

HEAD, K.H. **Manual of soil laboratory testing**: permeability, shear strenght and compressibility tests, e. 2., v. 2, Pentech Press, London, 747 p. 1994.

HSU, S.G.C. Argilas dispersivas. **Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5, São Paulo, ABMS, 1974. p. 323-333.

INDERBITZEN, A.L. An erosion test for soils. **Materials Research & Standards**, Philadelphia, v. 1, n. 7, p. 553-554, July 1961.

INFANTI JR., N. e FORNASARI FILHO, N. Processos de dinâmica superficial. In: OLIVEIRA, A.M. dos S. e BRITO, S.N.A. de (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p.131-152.

ISSMFE – INTERNATIONAL SOCIETY OF SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. **Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils**. Progress Report (1982-1985). Committee on tropical soils of the ISSMFE, ABMS, São Paulo, 449 p. 1985.

KORMANN, A.C.M. Comportamento de argilas rijas: aspectos geotécnicos da Formação Guabirotuba. **Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba**, Curitiba, ABMS e UFPR, 1999. p. 119-128.

\_\_\_\_\_. **Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba**: estudos de campo e laboratório. São Paulo, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

KORMANN, A.C.M.; NASCIMENTO, N.A. e CHAMECKI, P.R. – Editores. **Características geotécnicas da Formação Guabirotuba**. ANAIS DA MESA REDONDA. Curitiba: ABMS e UFPR, 1999(a). 202 p.

KORMANN, A.C.M.; CHAMECKI, P.R.; BOSZCZOWSKI, R.B.; BORGA, P.C. e NASCIMENTO, N.A. Ensaio de cisalhamento direto em argila rija da Formação Guabirotuba: influência da velocidade de deslocamento. **Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba**, Curitiba, ABMS e UFPR, 1999(b). p. 29-36.

KORMANN, A.C.M.; CHAMECKI, P.R.; NASCIMENTO, N.A. e DYMINSKI, A.S. Load tests on continuous flight auger piles in the Guabirotuba Formation. **Proceedings of the 11<sup>th</sup> Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, 11, Foz do Iguaçu, ISSMGE e ABMS, 1999(c). p. 1537-1544.



LAME – LABORATÓRIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS. **Manual do procedimento: elaboração e revisão de procedimentos – LAME 5.01**. Revisão nov.2001. Curitiba. 2001. (Documento interno).

LEMOS, C.F. **Avaliação da erosão superficial em áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional, utilizando o aparelho de Inderbitzen**. Curitiba, 2002. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, UFPR.

LAMBE, T.W. and WHITMAN, R.V. **Mecânica de solos**. Segunda reimpressão. México: Editorial Limusa, 1976. 582 p.

MACIEL JÚNIOR, O.C.; MARQUES, E.A.G.; SILVA, C.H.C.; MINETTE, E. e LIMA, D.C. Desenvolvimento de um aparelho Inderbitzen modificado para caracterização da erodibilidade de solos. **Anais do Congresso Nacional de Geotecnia**, 8, Lisboa, Sociedade Portuguesa de Geotecnia e LNEC, 2002. p. 381-390.

MAFRA, N.M.C. Erosão e planificação de uso do solo. In: GUERRA, A.J.T., SILVA, A.S. e BOTELHO, R.G.M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 301-322.

MARINHO, F.A.M. Medição de sucção com o método do papel filtro. **Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, 10, Foz do Iguaçu, ABMS, 1994. p. 515-522.

MASSAD, F.; ROCHA, J.L.R. e YASSUDA, A.J. Algumas características geotécnicas de solos da Formação Guabirotuba. **Anais do Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia**, Rio de Janeiro, ABMS, 1981. p.706-723.

MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, USA, 1993. 437 p.

NASCIMENTO, N.A. **Um estudo laboratorial em amostras indeformadas do solo sedimentar da Bacia de Curitiba e do solo residual de basalto do Paraná**. Curitiba, 1992. Tese (concurso para Professor Titular) – Setor de Tecnologia, UFPR.

NASCIMENTO, N.A.; CHAMECKI, P.R.; RUSSO NETO, L. e MERCURI, A. Estudo paramétrico preliminar dos solos sedimentares característicos da Bacia de Curitiba. **Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, 10, Foz do Iguaçu, ABMS, 1994. p.1277-1284.

NASCIMENTO, U. e CASTRO, E. Preventive measures against slope erosion – criteria for soil selection. **Memória LNEC**, N° 451, Lisboa, Ministério do Equipamento Social e do Ambiente e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1974. 19 p.

OLIVEIRA, M.A.T. de. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A.J.T., SILVA, A.S. e BOTELHO, R.G.M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos**: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 57-99.

PEREIRA, E.M. e PEJON, O.J. Estudo do potencial expansivo dos materiais argilosos da Formação Guabirotuba na região do Alto Iguaçu-PR. **Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba**, Curitiba, ABMS e UFPR, 1999. p. 18-28.

POPP, J.H. **Geologia geral**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998. 376 p.

PREVEDELLO, C.L. **Física do Solo**: com problemas resolvidos. Curitiba: SAEAFS, 1996. 446 p.

RODRIGUES, R. e LOPES, J.A.U. Rodovias. In: OLIVEIRA, A.M. dos S. e BRITO, S.N.A. de (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 419-430.

ROSENBERG, F.J. e SILVA, A.B.M. **Sistemas da Qualidade em Laboratórios de Ensaio**: guia prático para a interpretação e implementação da ABNT ISSO/IEC Guia 25. São Paulo: QualityMark, 1999.

SALAMUNI, E. **Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR)**. Rio Claro, 1998. 214 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.

SALAMUNI, E. e SALAMUNI, R. Contexto geológico da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba. **Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba**, Curitiba, ABMS e UFPR, 1999. p. 7-15.

SALOMÃO, F.X.T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A.J.T., SILVA, A.S. e BOTELHO, R.G.M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos**: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 229-267.

SANTOS, R.M.M. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Município de Goiânia**. Brasília, 1997. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

SHERARD, J.L., DUNNIGAN, L.P. and DECKER, R.S. Identification and nature of dispersive soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, vol. 102, no. GT4, p. 287-301, April 1976 (a).

SHERARD, J.L., DUNNIGAN, L.P., DECKER, R.S and STEELE, E.F. Pinhole test for identifying dispersive soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, vol. 102, no. GT1, p. 69-85, Jan. 1976 (b).

SIEDLECKI, K.N. e FIORI, A.P. Comportamento geotécnico do solo residual da Formação Guabirotuba (PR) à interação com soluções contaminantes. **Anais da Mesa Redonda Características Geotécnicas da Formação Guabirotuba**, Curitiba, ABMS e UFPR, 1999. p. 65-76.

SILVA, T.R.M. e LACERDA, W.A. Erodibilidade dos solos de uma voçoroca da região de Ouro Preto, Minas Gerais. Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 7. **Relação de trabalhos**. Goiânia: ABGE, [s.n.], 2001. CD-ROM.

SILVEIRA, M.A.A., SANTOS, N.B. e KOSHIMA, A. Estudos da dispersão de solos argilosos através dos ensaios químicos e de dispersão rápida. **Anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5, São Paulo, ABMS, 1974. p. 157-162.

VERTAMATTI, E. **Contribuição ao conhecimento geotécnico de solos da Amazônia com base na investigação de aeroportos e metodologias MCT e Resiliente**. São José dos Campos, 1988. 276 f. Tese (Doutorado em Transporte Aéreo) – Divisão de Pós-Graduação, Instituto Tecnológico da Aeronáutica.

## ANEXO – PLANILHAS DOS ENSAIOS DE EROSÃO

**AVALIAÇÃO DA DISPERSIBILIDADE DE SOLOS ARGILOSOS  
PELO ENSAIO DO TORRÃO ( CRUMB TEST)  
NBR-13601/96**

Registro da Amostra: \_\_\_\_\_

Data do Ensaio: \_\_\_\_\_

Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

Horário de Início do Ensaio: \_\_\_\_\_

Horário do Término do Ensaio: \_\_\_\_\_

**PREPARAÇÃO DO ENSAIO**

Dados da Amostra

Amostra	Menor Diâmetro (mm)	Maior Diâmetro (mm)
1		
2		
3		

**ENSAIO**

Observações:

1ª) Cinco minutos após o início do ensaio: \_\_\_\_\_

2ª) Dez minutos após o início do ensaio: \_\_\_\_\_

Grau de Comportamento das Amostras após uma hora do início:

Amostra	Grau de Comportamento
1	
2	
3	

Resultado:

Classificação do Solo quanto a Dispersibilidade: \_\_\_\_\_

Grau de Comportamento Predominante: \_\_\_\_\_

Observações:

Téc. Executor:

Téc. Conferente:

Eng. Responsável:

[illegible]

## SCS - Anotações

NBR-13602/96

NORMA UTILIZADA : NBR - 13602/96

REGISTRO DA AMOSTRA : \_\_\_\_\_

RESPONSÁVEL PELO ENSAIO : \_\_\_\_\_

DATA DO PREPARO DA AMOSTRA : \_\_\_\_\_

DATA DO ENSAIO : \_\_\_\_\_

HORÁRIO DE INICIO DO ENSAIO : \_\_\_\_\_

NÚMERO DO DENSÍMETRO : \_\_\_\_\_

NÚMERO DO TERMÔMETRO : \_\_\_\_\_

NÚMERO DO CRONÔMETRO : \_\_\_\_\_

MASSA DE MATERIAL ÚMIDO (Mh) : \_\_\_\_\_ g

### COLETA DE DADOS

Tempo			Referência	Leitura do densímetro	Temperatura (°C)	Leitura do densímetro corrigido
Real hora	min	seg				
		30	30 seg			
	1		1 min			
	2		2 min			
	4		4 min			
	8		8 min			
	15		15 min			
	30		30 min			
1			1 hora			
2			2 horas			
4			4 horas			
8			8 horas			
24			24 horas			

### UMIDADE DA AMOSTRA

Cápsula Número	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula mais solo úmido (g)	Massa da Cápsula mais solo seco (g)	Umidade (%)
Umidade Média (%) :				

Obs.:

Téc. Executor:

Téc. Conferente:

Eng. Responsável:



[illegible]

# SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO SCS

NBR-13602/1996

# SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO SCS

NBR-13602/1996

# SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO SCS

NBR-13602/1996

# SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO SCS

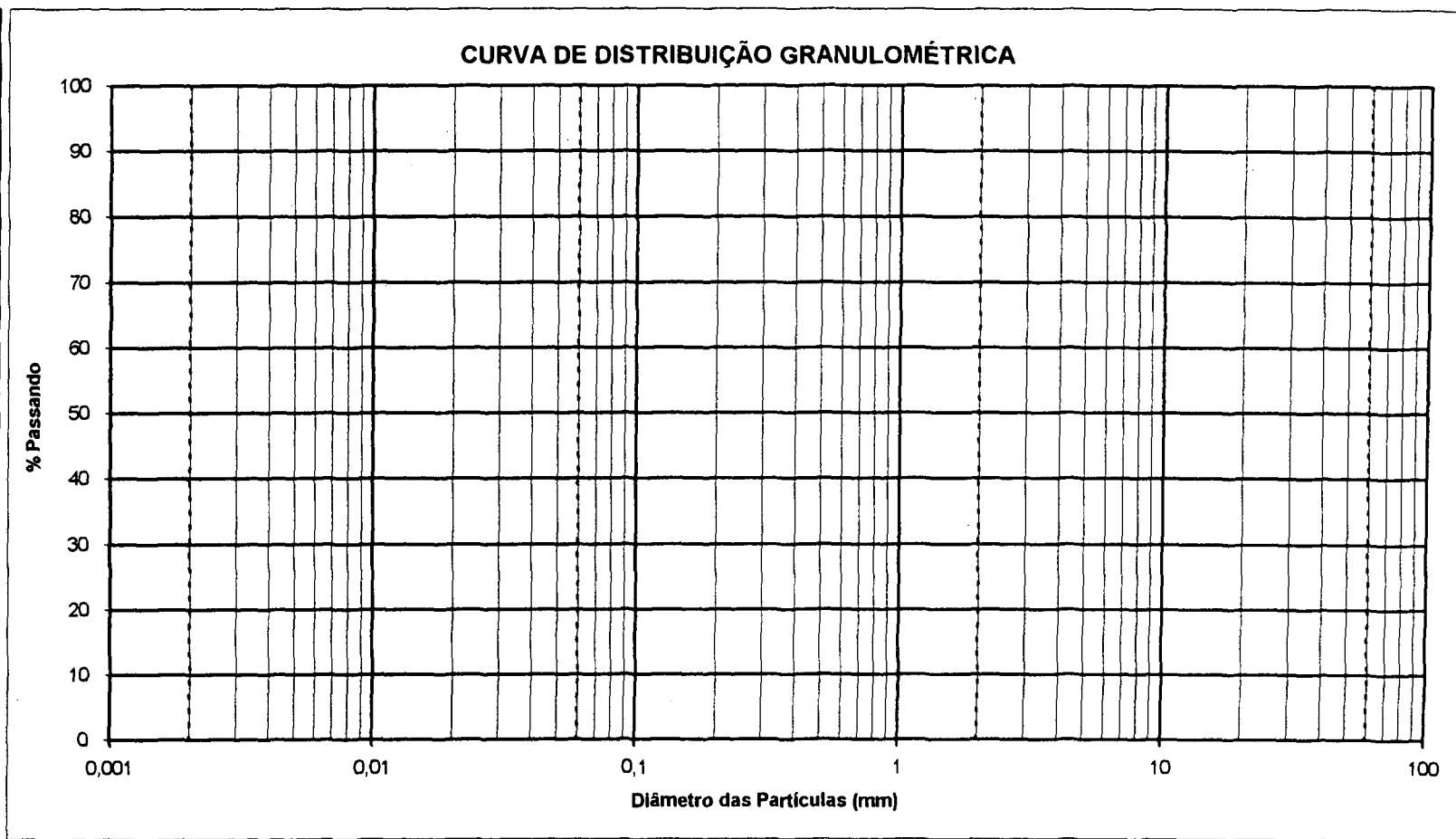
NBR-13602/1996

# SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO SCS

NBR-13602/1996

# SEDIMENTOMÉTRICO COMPARATIVO SCS

NBR-13602/1996

[illegible]

## ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO

REGISTRO DA AMOSTRA	TIPO DE AMOSTRA	DATA DA REALIZAÇÃO DO ENSAIO
DIMENSÕES DO PRISMA	UMIDADE DA AMOSTRA	RESPONSÁVEL PELA EXECUÇÃO

LAMINA D'ÁGUA: ALTURA DA BASE		TEMPO DO ENSAIO: 0 a 30 min	
CARACTERÍSTICAS	INTENSIDADE		VELOCIDADE
ASCENSÃO CAPILAR			
EXPANSÃO			
DESAGREGAÇÃO			
RUPTURA			
DISPERSÃO			
FRATURAMENTO			
OBSERVAÇÕES			

LAMINA D'ÁGUA: 1/3 DA ALTURA		TEMPO DO ENSAIO: 30 a 45 min	
CARACTERÍSTICAS	INTENSIDADE	VELOCIDADE	
ASCENSÃO CAPILAR			
EXPANSÃO			
DESAGREGAÇÃO			
RUPTURAS			
DISPERSÃO			
FRATURAMENTO			
OBSERVAÇÕES			

<b>LAMINA D'ÁGUA: 2/3 DA ALTURA</b>		<b>TEMPO DO ENSAIO: 45 a 60 min</b>
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>INTENSIDADE</b>	<b>VELOCIDADE</b>
ASCENSÃO CAPILAR		
EXPANSÃO		
DESAGREGAÇÃO		
RUPTURAS		
DISPERSÃO		
FRATURAMENTO		
OBSERVAÇÕES		

<b>LAMINA D'ÁGUA: IMERSÃO TOTAL</b>		<b>TEMPO DO ENSAIO: 24 horas</b>
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>INTENSIDADE</b>	<b>VELOCIDADE</b>
ASCENSÃO CAPILAR		
EXPANSÃO		
DESAGREGAÇÃO		
RUPTURAS		
DISPERSÃO		
FRATURAMENTO		
OBSERVAÇÕES		

Téc. Executor:	Téc. Conferente:	Eng. Responsável:

**AVALIAÇÃO DA DISPERSIBILIDADE DE SOLOS ARGILOSOS POR MEIO  
DE ENSAIOS QUÍMICOS EM AMOSTRAS DE ÁGUA INTERSTICIAL  
NBR-13603/96**

Data do Início do Ensaio: \_\_\_\_\_

Registro da Amostra: \_\_\_\_\_

Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

Número do Ensaio/Número de Ensaios Necessários: \_\_\_\_\_

**PREPARAÇÃO DA AMOSTRA**

Limite de Liquidez da Amostra: \_\_\_\_\_

Massa da Amostra: \_\_\_\_\_

Umidade Natural da Amostra: \_\_\_\_\_

Quantidade de Água Adicionada: \_\_\_\_\_

Número de Golpes: \_\_\_\_\_

Umidade da Amostra Após a Adição de Água: \_\_\_\_\_

Hora em que a Amostra foi Deixada em Repouso: \_\_\_\_\_

Data do Início da Aplicação de Vácuo: \_\_\_\_\_

Hora de Início da Aplicação de Vácuo: \_\_\_\_\_

Data do Término da Aplicação de Vácuo: \_\_\_\_\_

Hora do Término da Aplicação de Vácuo: \_\_\_\_\_

Volume de Água Intersticial Coletado: \_\_\_\_\_

pH da Água Intersticial Coletada: \_\_\_\_\_

**ENSAIO QUÍMICO**

Data da Análise Química: \_\_\_\_\_

Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

pH da Água Intersticial: \_\_\_\_\_

Volume de Água Intersticial: \_\_\_\_\_

Resultados da Análise Química

Na	Ca	Mg	K
meq/litro	meq/litro	meq/litro	meq/litro

Obs.:

Téc. Executor:

Téc. Conferente:

Eng. Responsável:

PONTOS DE VERIFICAÇÃO	VERIF.	RUBRICA
Tomar uma quantidade suficiente de uma fração representativa de solo e determinar sua umidade		
Acrescentar a quantidade necessária de água destilada para que o material fique próximo ao seu limite de liquidez.		
Homogeneizar a amostra conforme os procedimentos da NBR 6459 e ver se a amostra está próxima ao seu limite de liquidez, verificando se as bordas inferiores da ranhura se unem ao longo de 13mm de comprimento, com o número de 23 a 28 golpes.		
Acondicionar a amostra de solo em um saco plástico devidamente fechado e manter em repouso até o dia seguinte.		
Fazer a montagem do equipamento necessário para a extração de água intersticial da amostra.		
Espalhar a amostra sobre o papel-filtro, no interior do funil, pressionando-a levemente para minimizar a ocorrência de vazios, até que a espessura da camada de solo seja de aproximadamente 2 cm.		
Aplicar o vácuo de 88 KPa e revolver o material, cuidadosamente de modo a não danificar o papel-filtro, a pequenos intervalos de tempo.		
Verificar se o volume de água intersticial extraída da amostra é aproximadamente 100 mL.		
Caso o volume coletado não tenha sido suficiente, repetir as operações de extração de água intersticial até se obter o volume de aproximadamente 100 mL.		
Coletado o volume necessário de água intersticial a ser submetida à análise química, armazená-lo em um recipiente plástico bem vedado.		
Havendo demora na realização dos ensaios químicos, deve-se acrescentar ácido nítrico à solução, de forma que o pH seja menor que 1.		
EQUIPAMENTOS	METROLOGIA	
FUNIL DE BÜCHNER		
KITASSATO OU PICNÔMETRO DE 500 ml		
BOMBA DE VÁCUO		
VACUÔMETRO		
APARELHO DE CASAGRANDE		
CINZEL		
PROVETA		
ESTUFA		
DESSECADOR		
BALANÇA		
CONDIÇÕES DE ENSAIO		
<p>Estufa Ajustada para: <input type="checkbox"/> 105 a 110°C  <input type="checkbox"/> 60 a 65 °C</p> <p>Tipo de Análise Química: <input type="checkbox"/> Espectrofotometria de absorção atômica  <input type="checkbox"/> Outro método: _____</p>		
FORMULÁRIO		
<p>TDS = Ca + Mg + Na + K</p> <p>Porcentagem de sódio (%) = (Na/TSD) x 100</p> <p>RAS = <math>\frac{Na}{[(Ca + Mg)/2]^{1/2}}</math></p> <p>Ca, Mg, Na e K = quantidade dos cátions de cálcio, magnésio, sódio e potássio, em miliequivalente por litro (meq / litro)  TSD = quantidade Total de Sais Dissolvidos  RAS = Razão de Absorção de Sódio</p>		
OBSERVAÇÕES		

**AVALIAÇÃO DA DISPERSIBILIDADE DE SOLOS ARGILOSOS POR MEIO  
DE ENSAIOS QUÍMICOS EM AMOSTRAS DE ÁGUA INTERSTICIAL**

**NBR-13603/96**

Data do Início do Ensaio: \_\_\_\_\_

Registro da Amostra: \_\_\_\_\_

Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

Número do Ensaio/Número de Ensaios Necessários: \_\_\_\_\_

**Determinação das Umidades:**

**UMIDADE DA AMOSTRA ENSAIADA :**

Umidade da Amostra

Número da Cápsula	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula Mais Solo Úmido (g)	Massa da Cápsula Mais Solo Seco (g)	Umidade (%)
Umidade Média (%) :				

**VERIFICAÇÃO DA UMIDADE PARA O LIMITE DE LIQUIDEZ:**

Umidade da Amostra Após a Adição de Água

Número da Cápsula	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula Mais Solo Úmido (g)	Massa da Cápsula Mais Solo Seco (g)	Umidade (%)
Umidade Média (%) :				

**Observações:**

Téc. Executor:

Téc. Conferente:

Eng. Responsável:



**IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS ARGILOSOS DISPERSIVOS POR  
MEIO DO ENSAIO DO FURO DA AGULHA (PINHOLE TEST) COM CARGA E DESCARGA**

NBR - 14114/98

Data do Ensaio: \_\_\_\_\_  
 Registro da Amostra: \_\_\_\_\_  
 Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

Folha 1/1

**ENSAIO**

Tempo de Saturação da Amostra: \_\_\_\_\_

Coleta de Dados:

Carga Hidráulica: (mm de coluna d'água)	Tempo		Volume de Efluente Coletado (cm³)	Turbidez do Efluente	Vazão (cm³/s)
	min.	seg.			
50					
180					
380					

Téc. Executor:

Téc. Conferente:

Eng. Responsável:

**IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS ARGILOSOS DISPERSIVOS POR  
MEIO DO ENSAIO DO FURO DA AGULHA (PINHOLE TEST) COM CARGA E DESCARGA**

**NBR - 14114/98**

Data do Ensaio: \_\_\_\_\_  
 Registro da Amostra: \_\_\_\_\_  
 Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

Folha 2/2

**ENSAIO**

Tempo de Saturação da Amostra: \_\_\_\_\_

**Coleta de Dados:**

Carga Hidráulica: (mm de coluna d'água)	Tempo		Volume de Efluente Coletado (cm³)	Turbidez do Efluente	Vazão (cm³/s)
	min.	seg.			
1020					
380					
180					
50					

Téc. Executor:

Téc. Conferente:

Eng. Responsável:

**IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS ARGILOSOS DISPERSIVOS POR  
MEIO DO ENSAIO DO FURO DA AGULHA (PINHOLE TEST) COM CARGA E DESCARGA**

NBR - 14114/98

Data do Ensaio: \_\_\_\_\_  
 Registro da Amostra: \_\_\_\_\_  
 Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

**DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA AMOSTRA**

Umidade da Amostra: ☐ Umidade Natural  
☐ Umidade Higroscópica

Umidade da amostra a ser ensaiada ou compactada:

Número da Cápsula	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula Mais Solo Úmido (g)	Massa da Cápsula Mais Solo Seco (g)	Umidade (%)

Umidade Média (%) : \_\_\_\_\_

**UMIDADE DA AMOSTRA COMPACTADA**

Umidade da amostra compactada a ser ensaiada:

Número da Cápsula	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula Mais Solo Úmido (g)	Massa da Cápsula Mais Solo Seco (g)	Umidade (%)

Umidade Média (%) : \_\_\_\_\_

**UMIDADE DA AMOSTRA APOS O ENSAIO**

Umidade da amostra ensaiada:

Número da Cápsula	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula Mais Solo Úmido (g)	Massa da Cápsula Mais Solo Seco (g)	Umidade (%)

Umidade Média (%) : \_\_\_\_\_

**CROQUI DA AMOSTRA ENSAIADA**

CROQUI	
--------	--

Observações:

Téc. Executor:

Téc. Conferente:

Eng. Responsável:

**CONDIÇÕES DE ENSAIO**

Tipo da Amostra Utilizada:

☐ Amostra Indeformada

Massa do Cilindro de Ensaio (g): \_\_\_\_\_

Massa do Cilindro mais Amostra (g): \_\_\_\_\_

Umidade da Amostra (%): \_\_\_\_\_

Massa Específica Aparente Seca da Amostra: \_\_\_\_\_

☐ Amostra Compactada

Massa da Amostra Utilizada na Compactação: \_\_\_\_\_

Umidade da Amostra antes da Adição de Água: \_\_\_\_\_

Volume de Água adicionada (ml): \_\_\_\_\_

Data que a Amostra foi Deixada em Repouso: \_\_\_\_\_

Hora que a Amostra foi Deixada em Repouso: \_\_\_\_\_

Data que a Amostra foi Retirada do Repouso: \_\_\_\_\_

Hora que a Amostra foi Retirada do Repouso: \_\_\_\_\_

Umidade da Amostra Após o Repouso (%): \_\_\_\_\_

Massa do Cilindro de Ensaio (g): \_\_\_\_\_

Massa do Cilindro mais Amostra (g): \_\_\_\_\_

Massa Específica Aparente Seca da Amostra: \_\_\_\_\_

Condições da Amostra Ensaada:

☐ Amostra na Umidade Natural☐ Amostra Previamente Seca ao Ar☐ Amostra Ressecada☐ Amostra Saturada

Guia Centralizadora:

☐ Foi Utilizada☐ Não Foi Possível sua Utilização

Carga Aplicada ao Final do Ensaio: \_\_\_\_\_

Turbidez do Efluente ao Final do Ensaio: \_\_\_\_\_

Vazão ao Final do Ensaio: \_\_\_\_\_

Diâmetro do Furo ao Final do Ensaio: \_\_\_\_\_

Classificação da Amostra: \_\_\_\_\_

EQUIPAMENTOS	METROLOGIA
APARELHO PARA O ENSAIO DO FURO DE AGULHA (PINHOLE)	
PROVETA GRADUADA	
CRONÔMETRO	
BALANÇA, que permita pesar nominalmente 200g com resolução de 0,01g	
BALANÇA, que permita pesar nominalmente 1500g com resolução de 0,1g	
PAQUÍMETRO	
ESTUFA	
DESSECADOR	
PENEIRA DE 2 mm	
PENEIRA DE 4,8 mm	

**OBSERVAÇÕES**

PONTOS DE VERIFICAÇÃO	VERIF.	RUBRICA
Ligar as balanças 30 min antes de qualquer pesagem.		
No caso de corpo-de-prova compactado remover todas as partículas de areia e pedregulho com diâmetro superior a 2 mm antes da adição de água e homogeneização.		
Após homogeneização do material a ser compactado, ele deve ser mantido em cura por no mínimo 24 hs em um recipiente ermeticamente fechado.		
Fazer a determinação da umidade do solo utilizado na compactação antes da adição de água e após a cura do mesmo.		
Compactar a amostra no cilindro de ensaio de modo que ela atinga os 38 mm de altura.		
No caso de amostras indeformadas, moldar um corpo-de-prova com 38 mm de comprimento e diâmetro igual ao do cilindro de ensaio.		
Determinar a umidade da amostra indeformada a ser ensaiada, se for o caso.		
Pesar o cilindro de ensaio vazio e o cilindro de ensaio mais corpo-de-prova.		
Colocar duas telas de arame sob a base do corpo-de-prova e preencher o restante do cilindro de ensaio com areia grossa.		
Posicionar a tampa inferior do cilindro de ensaio, assegurando-se da estanqueidade.		
Inserir a guia centralizadora no centro do topo do corpo-de-prova usando a pressão dos dedos, de forma que a guia não venha a danificar a amostra, até que a base da guia fique nivelada com a superfície do topo do corpo-de-prova.		
Deve-se garantir que a guia seja inserida verticalmente à superfície do corpo-de-prova.		
Inserir a agulha dentro da guia através do corpo-de-prova, até que ela penetre na tela e na areia subjacente cerca de 10 mm.		
Remover a agulha do corpo-de-prova girando-a quatro ou cinco vezes durante a extração.		
Colocar duas telas de arame sob o topo do corpo-de-prova e preencher o restante do cilindro de ensaio com areia grossa.		
Posicionar a tampa superior do cilindro de ensaio, assegurando-se da estanqueidade.		
Conectar a fonte de água e o manômetro, colocando o aparelho montado na horizontal.		
Começar o ensaio fazendo as três primeiras determinações dos tempos para 10 cm <sup>3</sup> .		
Fixar um volume ou um intervalo de tempo para as observações de turbidez e vazão.		
Observar a turbidez e a vazão do efluente a cada medida de descarga e mudança de carga.		
Ao final do ensaio retirar o corpo-de-prova e parti-lo ao meio para determinar o diâmetro do furo ao longo do corpo-de-prova e fazer um croqui do mesmo.		

#### CONDIÇÕES DE ENSAIO

Estufa ajustada para:

- ☐ 105°C a 110°C  
☐ 60°C a 65°C

#### FOMULÁRIO

##### GRAUS DE COMPORTAMENTO:

##### ND1 - Não dispersivo

Caso a amostra, sob a carga de 1020 mm, apresentar no final do ensaio uma vazão inferior a 4,0 cm<sup>3</sup>/s e o tamanho do furo não for sensivelmente superior ao diâmetro da agulha.

##### ND2 - Incipientemente dispersivo

Quando a amostra apresentar ao final do ensaio, sob a carga de 1020mm, uma leve turbidez, ou uma vazão superior a 5,0cm<sup>3</sup>/s.

##### ND3 - Levemente dispersivo

Se após o final da aplicação da carga de 180mm sob a amostra, o efluente for escuro ou levemente escuro, se o fluxo aumentar rapidamente para valores maiores que 2,5cm<sup>3</sup>/s e se o diâmetro do furo for maior que dois diâmetros da agulha. Ou quando após a aplicação da carga de 380mm sob a amostra, o fluxo vir a se tornar escuro ou levemente escuro, ou se a vazão for de 3,5cm<sup>3</sup>/s.

##### ND4 - Moderadamente dispersiva

Se a vazão for menor que 0,8cm<sup>3</sup>/s e o tamanho do furo não exceder 1,5 vez o diâmetro da agulha, com uma carga de 50mm sob a amostra.

##### D2 - Dispersivo

Apresentar, com a carga de 50 mm sob a amostra, no final do ensaio um fluxo levemente escuro, a vazão maior que 1,0 cm<sup>3</sup>/s e o diâmetro do furo for maior que duas vezes o diâmetro da agulha.

##### D1 - Altamente dispersivo

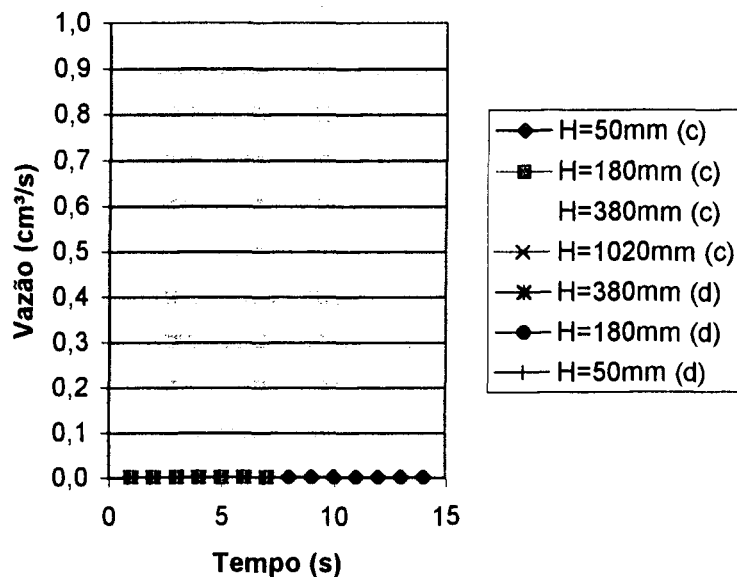
Se sob uma carga de 50 mm a amostra apresentar um efluente escuro, uma vazão entre 1,5 e 2,0 cm<sup>3</sup>/s e o diâmetro do furo maior que duas vezes o diâmetro da agulha.

**IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO POR MEIO DO ENSAIO DO FURO DE AGULHA  
(PINHOLE TEST) DE SOLOS ARGILOSOS DISPERSIVOS**

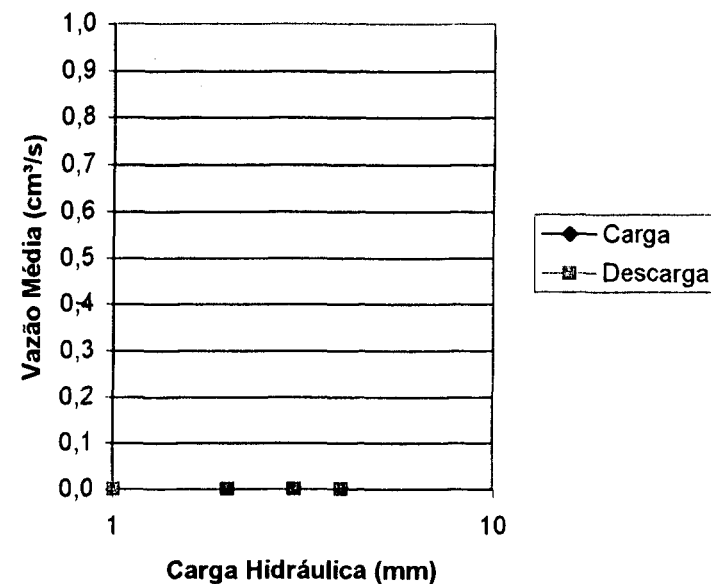
NBR - 14114/98

Data do Ensaio: \_\_\_\_\_  
 Registro da Amostra: \_\_\_\_\_  
 Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

**Vazão versus Tempo**



**Vazão Média versus Carga Hidráulica**



Observações	Índices físicos	Croqui do C.P	Classificação quanto à dispersividade
	Téc.Executor:	Téc.Conferente:	Eng.Responsável:

## ENSAIO DE EROSÃO NO APARELHO DE INDERBITZEN

Data do Ensaio: \_\_\_\_\_

Registro da Amostra: \_\_\_\_\_

Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

### ENSAIO

Número do Anel: \_\_\_\_\_

Área do Anel (cm<sup>2</sup>): \_\_\_\_\_

Umidade da Amostra a ser Ensaída (%): \_\_\_\_\_

Tempo da Coleta do Material Erodido (min)	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula mais Solo Seco Erodido (g)	Massa de Solo Seco Erodido Retido na Peneira (g)
1			
5			
10			
15			
20			
30			
40			
50			
60			
80			
100			

Tempo da Coleta do Material Erodido (min)	Massa de Solo Seco Erodido Estimado que passa pela Peneira (g)	Massa de Solo Seco Erodido Parcial (g)	Massa de Solo Seco Erodido Acumulado (g)
1			
5			
10			
15			
20			
30			
40			
50			
60			
80			
100			

### OBSERVAÇÕES

Téc. Executor:

Téc. Conferente:

Eng. Responsável:

**CONDIÇÕES DE ENSAIO**Perfil da Camada em  
que a Amostra foi Extraída:

- ☐ Exposta ao sol / Mais ressecada  
☐ Não exposta ao sol / Menos ressecada

Tipo da Amostra Utilizada:

- ☐ Amostra Indeformada  
☐ Amostra Compactada

Condições da Amostra Ensaída:

- ☐ Amostra na umidade natural  
☐ Amostra ressecada  
☐ Amostra na umidade ótima  
☐ Amostra saturada

Anel Utilizado no Ensaio:

- ☐ Metálico  
☐ PVC

**CONTROLE DE VAZÃO**

Controle de vazão antes do início de ensaio:

Tempo (s)	Volume de água (l)	Vazão (l/s)	Vazão em (ml/s)
Valor Médio da Vazão Antes do Início do Ensaio			

Controle de vazão durante o ensaio:

Tempo (min)	Volume de água (l)	Vazão (l/s)	Vazão em (ml/s)
1			
5			
10			
15			
20			
Valor Médio da Vazão Durante o Ensaio			

**VALORES COMPLEMENTARES**

Volume de água coletada pelos recipientes:

Recipiente	Massa do Recipiente Vazio (g)	Massa do Recipiente mais Água (g)	Massa ou Volume de Água no Recipiente (g / ml)
1 min			
5 min			
10 min			
15 min			
20 min			

Peso do solo erodido através da infiltração de água pela amostra:

Número da Cápsula	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula + Solo Seco não Erodido que Infiltra (g)	Massa de Solo Seco

Peso do solo não erodido que fica retido no suporte de fixação do fundo do anel:

Número da Cápsula	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula + Solo Seco não Erodido (g)	Massa de Solo Seco



## ENSAIO DE EROSÃO NO APARELHO DE INDERBITZEN

Data do Ensaio: \_\_\_\_\_

Registro da Amostra: \_\_\_\_\_

Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

### ESTIMATIVA DE SOLO ERODIDO QUE PASSA PELA PENEIRA

Estimativa do solo erodido que passa pela peneira:

Tempo da Coleta do Material Erodido (min)	Volume de Água no Recipiente (ml)	Volume de Água Coletada para a Estimativa (ml)	Massa de Solo Seco Erodido do Volume de Água Coletado (g)	Massa de Solo Seco Erodido Estimado que Passa pela Peneira (g)
1				
5				
10				
15				
20				

### PESO DE SOLO SECO ERODIDO DO VOLUME DE ÁGUA COLETADO

Peso de solo seco erodido do volume de água coletado no recipiente:

Tempo da Coleta do Material Erodido (min)	Número da Cápsula	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula mais Solo Seco (g)	Massa de Solo Seco Erodido do Volume de Água Coletado (g)
1				
5				
10				
15				
20				

### UMIDADES

Umidade da amostra:

Número	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa da Cápsula mais Solo Úmido (g)	Massa da Cápsula mais Solo Seco (g)	Umidade (%)
Umidade Média (%)				

Umidade da amostra antes do início do ensaio:

Número da Cápsula	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa do Anel Vazio (g)	Massa da Cápsula mais Solo Úmido mais Anel (g)	Massa da Cápsula mais Solo Seco mais Anel (g)	Umidade (%)

Umidade da amostra após o ensaio:

Número da Cápsula	Massa da Cápsula Vazia (g)	Massa do Anel Vazio (g)	Massa da Cápsula mais Solo Úmido mais Anel (g)	Massa da Cápsula mais Solo Seco mais Anel (g)	Umidade (%)

PONTOS DE VERIFICAÇÃO	VERIF.	RUBRICA
Ligar a balança 30 minutos antes de qualquer pesagem.		
Verificar as condições iniciais da amostra, como: umidade, perfil da camada na qual foi coletada e se foi posta para ressecar.		
Desbastar a superfície do anel, de maneira que não provoque desagregação e que não se deixe material solto sobre a superfície desbastada.		
Pesar o anel mais solo mais cápsula antes do início do ensaio.		
Colocar o anel perfeitamente ajustado à superfície da rampa, fixando-o com o suporte.		
Fazer a vedação do conjunto anel-rampa e anel-suporte, evitando a infiltração de água que pode vir a ocorrer entre o anel-rampa e anel-suporte.		
Caso não seja possível a vedação do conjunto anel-rampa e anel-suporte, deve-se providenciar um recipiente adequado para coletar o possível material carreado pela infiltração, que será considerado após o término do ensaio como material não erodido.		
Proteger a amostra com a colocação do papel filme sobre a rampa.		
Abrir o sistema do Escoamento Superficial e aguardar pelo menos 1 minuto, ou até a estabilização do escoamento.		
Fazer no mínimo três determinações de vazão antes de dar início ao ensaio como comprovação da estabilização do escoamento superficial.		
Verificar se as peneiras destinadas a coleta do material erodido estão devidamente posicionada no final da rampa.		
Retirar o papel filme que está sobre a rampa, ativar o cronômetro e colocar o recipiente adequado para o controle de vazão durante o primeiro minuto de ensaio simultaneamente e dar início ao ensaio.		
Nos tempos de 1, 5, 10, 15 e 20 minutos, deverá ser feita a troca de peneira e a substituição do recipiente adequado para os controles de vazão durante o ensaio.		
Retirar a última peneira aos 20 minutos e fechar o sistema do escoamento superficial, caso o ensaio não seja prolongado.		
Lavar o material coletado pelas peneiras em cápsulas metálicas devidamente pesadas e identificadas, para cada intervalo de tempo.		
Levar o material coletado pelas peneiras para a estufa até atingir constância de massa.		
Retirar, cuidadosamente, o anel da rampa, pesá-lo e levá-lo à estufa até atingir constância.		
Determinar o volume de água coletado pelos recipientes destinados ao controle de vazão durante o ensaio.		
Coletar uma quantidade de água conhecida e suficiente de cada recipiente do controle de vazão durante o ensaio para a estimativa do material erodido que passa pelas peneiras.		
Colocar a água coletada para a estimativa do material erodido que passa pelas peneiras em recipientes metálicos adequados e devidamente pesados e identificados.		
Levar os recipientes metálicos destinados à estimativa do material erodido que passa pelas peneiras à estufa até atingir constância de massa.		
O material que ficar retido no suporte do anel, ou foi carreado pela infiltração, ou que se soltou do anel, que é considerado como não erodido, deverá ser acondicionado em um recipiente metálico adequado e devidamente pesado e identificado.		
Levar a cápsula metálica com o material não erodido para estufa até constância de massa.		
Para ensaios com duração maior que 20 minutos, deve ser feita a troca de peneiras e a substituição, ou remoção, ou proteção dos recipientes de controle de vazão durante restante do ensaio.		
Proceder ao final do tempo prolongado da mesma forma como exposto para o ensaio com duração de 20 minutos.		
<b>EQUIPAMENTOS</b>	<b>METROLOGIA</b>	
BALANÇA, com capacidade de 1500g e precisão de 0,01g		
BALANÇA, com capacidade de 40000g e precisão de 1g		
DESSECADOR		
ESTUFA		
NÚMERO DO ANEL		
CRONÔMETRO		
PENEIRA		
PENEIRA		

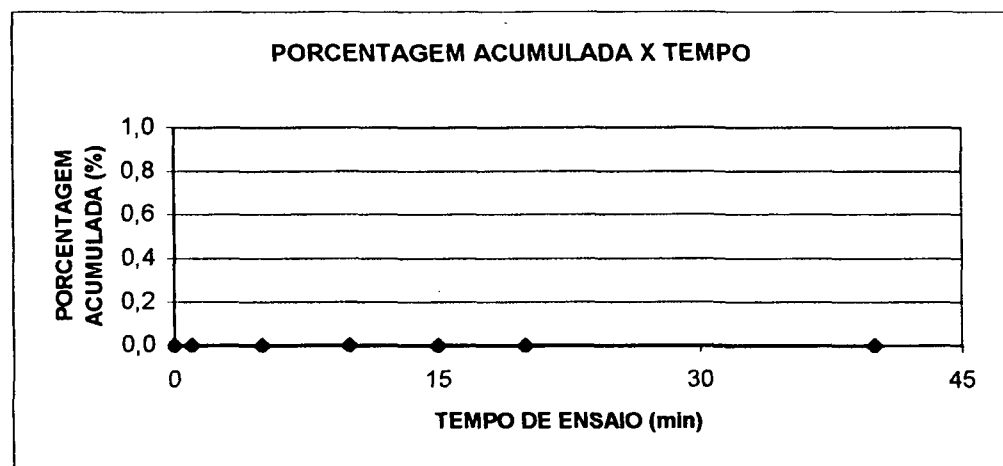
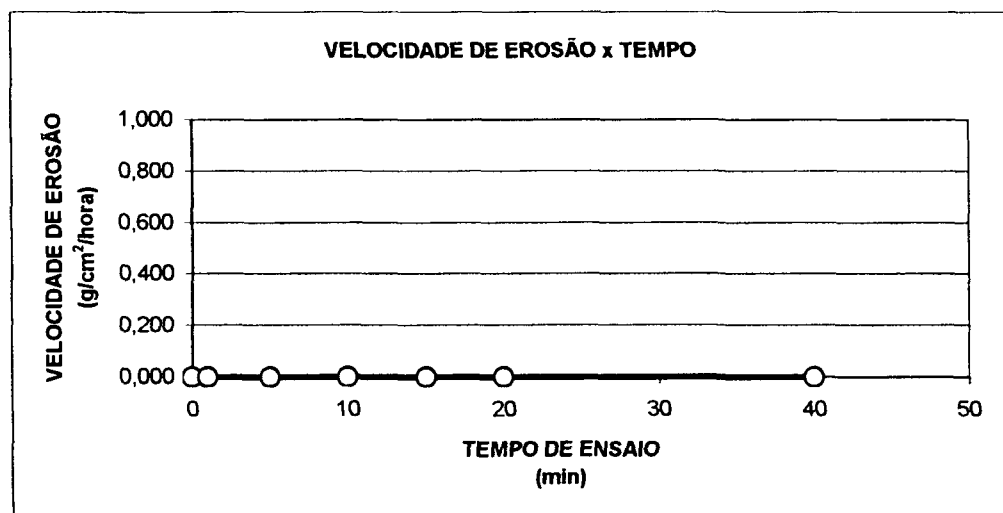
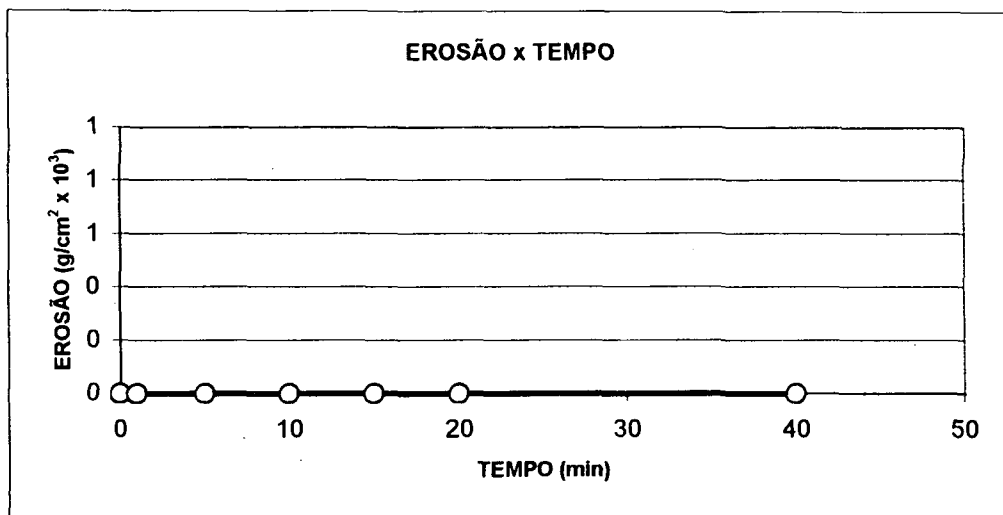
## ENSAIO DE EROSÃO NO APARELHO DE INDERBITZEN

Data do Ensaio: \_\_\_\_\_

Registro da Amostra: \_\_\_\_\_

Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

### GRÁFICOS



## ENSAIO DE EROSÃO INDERBITZEN MODIFICADO

Data do Ensaio: \_\_\_\_\_

Registro da Amostra: \_\_\_\_\_

Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

### ENSAIO

Área da Amostra (cm<sup>2</sup>): \_\_\_\_\_

Umidade da Amostra a ser Ensaçada (%): \_\_\_\_\_

Tempo da Coleta do Material Erodido (min)	Peso da Cápsula Vazia (g)	Peso da Cápsula mais Solo Seco Erodido (g)	Peso de Solo Seco Erodido Retido na Peneira (g)

Tempo da Coleta do Material Erodido (min)	Peso de Solo Seco Erodido Estimado que passa pela Peneira (g)	Peso de Solo Seco Erodido Parcial (g)	Peso de Solo Seco Erodido Acumulado (g)

Téc. Executor:

Téc. Conferente:

Eng. Responsável:

**CONDIÇÕES DE ENSAIO**

- Perfil da Camada em que a Amostra foi Extraída: ☐ Exposta ao sol / Mais ressecada  
☐ Não exposta ao sol / Menos ressecada
- Tipo da Amostra Utilizada: ☐ Amostra Indeformada  
☐ Amostra Compactada
- Condições da Amostra Ensaída: ☐ Amostra na umidade natural  
☐ Amostra ressecada  
☐ Amostra na umidade ótima  
☐ Amostra saturada

**CONTROLE DE VAZÃO**

Controle de vazão antes do início de ensaio:

Tempo (s)	Volume de água (l)	Vazão (l/s)	Vazão em (ml/s)
Valor Médio da Vazão Antes do Início do Ensaio			

Controle de vazão durante o ensaio:

Tempo (min)	Volume de água (l)	Vazão (l/s)	Vazão em (ml/s)
1			
5			
10			
15			
20			
Valor Médio da Vazão Durante o Ensaio			

**VALORES COMPLEMENTARES**

Volume de água coletada pelos recipientes:

Recipiente	Peso do Recipiente Vazio (g)	Peso do Recipiente mais Água (g)	Peso ou Volume de Água no Recipiente (g / ml)
1 min			
5 min			
10 min			
15 min			
20 min			

**OBSERVAÇÕES**

## ENSAIO DE EROSÃO INDERBITZEN MODIFICADO

Data do Ensaio: \_\_\_\_\_

Registro da Amostra: \_\_\_\_\_

Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

### ESTIMATIVA DE SOLO ERODIDO QUE PASSA PELA PENEIRA

Estimativa do solo erodido que passa pela peneira:

Tempo da Coleta do Material Erodido (min)	Volume de Água no Recipiente (ml)	Volume de Água Coletada para a Estimativa (ml)	Peso de Solo Seco Erodido do Volume de Água Coletado (g)	Peso de Solo Seco Erodido Estimado que Passa pela Peneira (g)
1				
5				
10				
15				
20				

### PESO DE SOLO SECO ERODIDO DO VOLUME DE ÁGUA COLETADO

Peso de solo seco erodido do volume de água coletado no recipiente:

Tempo da Coleta do Material Erodido (min)	Número da Cápsula	Peso da Cápsula Vazia (g)	Peso da Cápsula mais Solo Seco (g)	Peso de Solo Seco Erodido do Volume de Água Coletado (g)
1				
5				
10				
15				
20,5				

### UMIDADES

Umidade da amostra:

Número	Peso da Cápsula Vazia (g)	Peso da Cápsula mais Solo Úmido (g)	Peso da Cápsula mais Solo Seco (g)	Umidade (%)
Umidade Média (%)				

Umidade da amostra antes do início do ensaio:

Número da Cápsula	Peso da Cápsula Vazia (g)	Peso da Cápsula mais Solo Úmido (g)	Peso da Cápsula mais Solo Seco (g)	Umidade (%)

Umidade da amostra após o ensaio:

Número da Cápsula	Peso da Cápsula Vazia (g)	Peso da Cápsula mais Solo Úmido (g)	Peso da Cápsula mais Solo Seco (g)	Umidade (%)

[illegible]

## ENSAIO DE EROSÃO INDERBITZEN MODIFICADO

Data do Ensaio: \_\_\_\_\_

Registro da Amostra: \_\_\_\_\_

Responsável pela Execução: \_\_\_\_\_

### GRÁFICOS

